

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

Automação e Integração CAD/CAE no Projeto de
Estruturas Metálicas, Utilizando Perfis Tubulares

Maurício Guilherme Quilez Souza

Campinas
2006

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

Automação e Integração CAD/CAE no Projeto de Estruturas Metálicas, Utilizando Perfis Tubulares

Autor: **Maurício Guilherme Quilez Souza**

Orientador: **Prof. Dr. João Alberto Venegas Requena**

Dissertação de Mestrado apresentado à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Estruturas.

Campinas
2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

So89a Souza, Maurício Guilherme Quilez
Automação e integração CAD/CAE no projeto de
estruturas metálicas, utilizando perfis tubulares /
Maurício Guilherme Quilez Souza.--Campinas, SP:
[s.n.], 2006.

Orientador: João Alberto Venegas Requena.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo.

1. Estruturas metálicas. 2. AutoCAD (Programa de
computador). 3. Automação. 4. Projeto estrutural. 5.
Aço tubular. I. Requena, João Alberto Venegas. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Titulo em Inglês: Automation and integration CAD/CAE on the design of steel
structures, using hollow sections.

Palavras-chave em Inglês: Steel structures, CAD/CAE, Structural automation,
Structural design, Hollow steel sections.

Área de concentração: Estruturas.

Titulação: Mestrado

Banca examinadora: Renato Bertolino Junior, José Luiz Antunes de Oliveira e Souza.

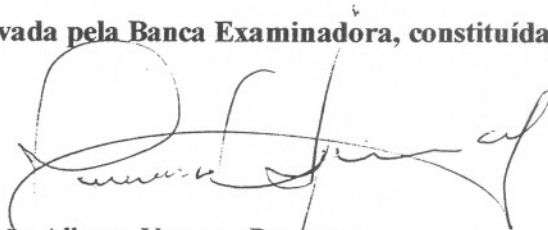
Data da defesa: 28/08/2006.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**AUTOMAÇÃO E INTEGRAÇÃO CAD/CAE NO PROJETO DE ESTRUTURAS
METÁLICAS, UTILIZANDO PERFIS TUBULARES.**

Maurício Guilherme Quilez Souza

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



**Prof. Dr. João Alberto Venegas Requena
Presidente e Orientador(a)/Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP**



**Prof. Dr. Renato Bertolino Junior
Universidade Estadual de São Paulo – UNESP**



**Prof. Dr. José Luiz Antunes de Oliveira e Sousa
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP**

A meus pais Ana Maria e Carmelino, e a minha querida filha

Campinas, 28 de agosto de 2006.

A meus pais Ana Maria e Carmelino, e a minha querida Lgia.

Agradecimentos

Ao Departamento de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil - UNICAMP pela infraestrutura e pelo conhecimento obtido ao longo dos anos.

À V&M do Brasil e ao SAE pela bolsa de estudos.

Ao amigo e orientador Prof . Dr. João Alberto Venegas Requena pela orientação, dedicação e incentivo ao meu trabalho.

Aos amigos e professores do Departamento de Estruturas pelo suporte e interesse no desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos do LabMeC, em especial ao Renatão, Pira, César, Roberto, Daniela e Alaor.

Aos amigos Pira e Rafael, pela ajuda nos momentos finais deste trabalho.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de códigos de computador que têm a finalidade de automatizar as etapas principais de um projeto de estruturas metálicas através das linguagens *AutoLISP* e *Delphi5*. Os projetos de estruturas metálicas em estudo são os de coberturas com treliças planas constituídas de barras com perfis tubulares laminados sem costuras e seus contraventamentos. Estes perfis tubulares, ainda pouco utilizados em estruturas planas no Brasil, vêm sendo disseminados através do uso de programas que ajudam os engenheiros a utilizá-los adequadamente em seus projetos tendo em vista que resultam em estruturas mais leves e de fácil fabricação. Desta forma, houve a necessidade de desenvolver um sistema *CAD/CAE*, para automatizar a geração das geometrias das estruturas planas, além das representações gráficas do sistema geral tridimensional de contraventamentos da estrutura - *CAD*; exportar os dados para um programa integrado que realiza um processo otimizado de toda a análise estrutural e dimensionamento - *CAE* e, finalmente, retornar os dados processados para o ambiente *CAD*, para realizar o detalhamento automático das ligações da estrutura treliçada analisada. Todos os procedimentos adotados para automação dos projetos seguem recomendações de normas técnicas brasileiras principalmente a NBR8800/1986.

Palavras Chave: Estruturas Metálicas, *CAD/CAE*, Automação de Projeto de Estruturas, Projeto Estrutural, Perfis Tubulares.

Abstract

This work has as objective to show a software that have the goal to automate the main stages of a steel structural design, using *AutoLISP* and *Delphi5* languages. The steel structural designs in case are the roofs formed by plane trusses made by hollow sections frames. These hollow steel sections, which are not highly used in plane structures in Brazil, are being disseminated by the use of softwares that help civil engineers to use them correctly in their designs, in view of that they result in less weighted and easy manufactured structures. So, there is the necessity to develop a *CAD/CAE* system, that will automate the generation of the geometries from plane structures and the graphical designs from the three-dimensional general system - *CAD*; also, we have the necessity to export the data to an integrated computer program that executes an optimized process from the entire structural analysis and design - *CAE*; and, finally, to return the proceeded data back to *CAD* environment, to draw the automatic details from the connections of the analyzed structure. All the procedures and methods used to automate the design follows the specifications of Brazilian Design Codes, mainly the NBR-8800/1986.

Keywords: Steel Structures, *CAD/CAE*, Structural Automation, Structural Design, Hollow Steel Sections.

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | Considerações Gerais | 1 |
| 1.1.1 | A Importância da Automação | 2 |
| 1.2 | Estado da Arte | 3 |
| 1.2.1 | A Família AutoMETAL | 5 |
| 1.2.2 | A Família AutoVentos | 10 |
| 1.2.3 | Programas Comerciais | 15 |
| 1.3 | Proposta de Trabalho | 22 |
| 2 | Fundamentos Teóricos | 25 |
| 2.1 | Das Barras Tubulares de Aço na Estrutura | 25 |
| 2.2 | Das Treliças nas Estruturas | 29 |
| 2.2.1 | Treliças Planas e Configurações das Barras | 30 |
| 2.2.1.1 | Treliças de Duas Águas | 30 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.2.1.2 | Treliças de Banzos Paralelos | 31 |
| 2.2.1.3 | Treliças de Arcos Circulares | 32 |
| 2.2.1.4 | Treliças de Arcos Parabólicos | 34 |
| 2.3 | Dos Contraventamentos nas Estruturas | 35 |
| 2.4 | Do AutoCAD e do AutoLISP | 38 |
| 2.5 | Das Ligações nas Estruturas | 40 |
| 2.5.1 | Considerações Gerais | 40 |
| 2.5.2 | Classificação das Ligações | 41 |
| 2.5.3 | Nomenclatura das Ligações entre Tubos | 45 |
| 3 | Desenvolvimento das Rotinas de Geração da Estrutura | 49 |
| 3.1 | Considerações Gerais | 49 |
| 3.2 | Inserindo as Rotinas no AutoCAD | 49 |
| 3.3 | Rotina de Treliças de Duas Águas | 51 |
| 3.3.1 | Geração da Geometria da Treliça | 51 |
| 3.3.2 | Análise dos Dados de Entrada e Execução do Projeto da Treliça . . . | 53 |
| 3.3.3 | Geração da Planta de Contraventamentos da Estrutura | 58 |
| 3.3.4 | Geração das Linhas de Corrente | 65 |
| 3.3.5 | Geração dos Cortes na Estrutura | 69 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.4 | Rotina de Treliças de Banzos Paralelos | 74 |
| 3.4.1 | Geração da Geometria da Treliça | 74 |
| 3.4.2 | Análise dos Dados de Entrada e Execução do Projeto da Treliça . . . | 77 |
| 3.4.3 | Geração da Planta de Contraventamentos da Estrutura | 80 |
| 3.5 | Rotina de Treliças de Arcos Circulares | 81 |
| 3.5.1 | Geração da Geometria da Treliça | 81 |
| 3.5.2 | Análise dos Dados de Entrada e Execução do Projeto da Treliça . . . | 83 |
| 3.5.3 | Geração da Planta de Contraventamentos da Estrutura | 91 |
| 4 | Integração CAD CAE | 93 |
| 5 | Desenvolvimento das Rotinas de Detalhamento das Ligações Típicas | 101 |
| 5.1 | Considerações Gerais | 101 |
| 5.2 | Rotina de Ligação K | 102 |
| 5.2.1 | Análise dos Dados de Entrada | 103 |
| 5.2.2 | Geração do Detalhamento da Ligação Tipo “K” | 104 |
| 5.3 | Rotina de Ligação TK | 108 |
| 5.3.1 | Análise dos Dados de Entrada | 109 |
| 5.3.2 | Geração do Detalhamento da Ligação Tipo “TK” | 110 |

| | | |
|----------|-----------------------------------|------------|
| 6 | Considerações Finais | 115 |
| | Referências Bibliográficas | 117 |

Lista de Figuras

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Geometria do arco treliçado e planta com os contraventamentos gerados automaticamente. | 4 |
| 1.2 | Tela principal do AutoMETAL 1.01 - UNICAMP, com a representação de uma treliça de duas águas. | 6 |
| 1.3 | Tela do AutoMETAL 3.01 - UNICAMP, ilustrando os pilares na estrutura. . | 7 |
| 1.4 | Tela do AutoMETAL 1.01 - V&M do Brasil - UNICAMP. | 8 |
| 1.5 | Tela do AutoMETAL 3.01 - V&M do Brasil - UNICAMP. | 9 |
| 1.6 | Tela do AutoMETAL 4.1 - UNICAMP. | 10 |
| 1.7 | Tela do AutoVentos - Duas Águas, pedindo os dados de entrada da edificação. | 11 |
| 1.8 | Tela do AutoVentos - Otimização, mostrando os resultados dos coeficientes externos das paredes. | 12 |
| 1.9 | Combinação dos coeficientes externos e internos de um arco. | 13 |
| 1.10 | Tela inicial do AutoVentos - Shed, pedindo os dados de entrada ao usuário. | 14 |
| 1.11 | Tela do AutoVentos - AutoTorres, pedindo os dados de entrada para a geração automática de uma torre de telecomunicações. | 15 |

| | | |
|------|---|----|
| 1.12 | Tela do ST_CadEM. | 17 |
| 1.13 | Deslocamento do nó 13 visualizado na tela do programa. | 18 |
| 1.14 | Tela do TecnoMETAL 2D. | 21 |
| 2.1 | Foto do Terminal I do Aeroporto Internacional de Stuttgart, Alemanha. Adaptado de [31]. | 26 |
| 2.2 | Fluxo do processo dos tubos sem costura da V&M do Brasil. Adaptado de [14]. | 29 |
| 2.3 | Treliça de Duas Águas. | 30 |
| 2.4 | Treliça <i>Howe</i> | 31 |
| 2.5 | Treliça <i>Pratt</i> | 31 |
| 2.6 | Treliça de Banzos Paralelos. | 32 |
| 2.7 | Treliça de Arcos Circulares. | 33 |
| 2.8 | Treliça de Arco Parabólico. | 34 |
| 2.9 | Contraventamento horizontal do banzo superior. | 36 |
| 2.10 | Contraventamentos horizontais dos banzos inferior e superior. | 36 |
| 2.11 | Contraventamento horizontal do banzo superior e vertical do banzo inferior. . | 36 |
| 2.12 | Exemplo de Ligação Rígida. Adaptado de [18]. | 41 |
| 2.13 | Cisalhamento Centrado. Adaptado de [18]. | 42 |
| 2.14 | Cisalhamento Excêntrico. Adaptado de [18]. | 43 |
| 2.15 | Tração Centrada. Adaptado de [18]. | 43 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.16 | Tração com Cisalhamento. Adaptado de [18]. | 43 |
| 2.17 | Arranjos das barras em uma ligação do tipo “K”. | 44 |
| 2.18 | Terminologia de uma ligação tipo “K”. | 46 |
| 2.19 | Terminologia de uma ligação tipo “KT”. | 47 |
| 3.1 | Tela inicial do AutoCAD, exibindo que as rotinas foram carregadas. | 50 |
| 3.2 | Caixa de Diálogo do AutoCAD, para a introdução dos dados de entrada do programa. | 52 |
| 3.3 | Dados de entrada da rotina de Treliças de Duas Águas. | 53 |
| 3.4 | Localização de pontos importantes no desenho da treliça. | 55 |
| 3.5 | Os ângulos deste exemplo estão no intervalo proposto em 2.2.1.1. | 56 |
| 3.6 | O novo arranjo das barras permite diminuir o ângulo da última diagonal, resultando numa melhor distribuição das ações na treliça. | 56 |
| 3.7 | Arranjo realizado automaticamente, caso algum ângulo seja menor que 20°. . | 57 |
| 3.8 | Texto retirado da tela do AutoCAD, com dados calculados automaticamente. | 57 |
| 3.9 | Caixa de Diálogo do AutoCAD, pedindo dados referentes ao galpão. | 58 |
| 3.10 | Representação das treliças na planta de contraventamentos da estrutura. . . | 59 |
| 3.11 | Representação das terças na planta de contraventamentos da estrutura. . . | 60 |
| 3.12 | Contraventamento das duas fachadas da estrutura realizado automaticamente. | 61 |
| 3.13 | Representação dos contraventamentos internos. | 63 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.14 | Representação dos contraventamentos internos para CBS2D maior que 5. . . | 64 |
| 3.15 | Representação dos contraventamentos internos para CBS2D menor que 5. . . | 65 |
| 3.16 | Detalhe das linhas de corrente, para distância entre treliças inferiores ou iguais a 5 metros. | 67 |
| 3.17 | Detalhe das linhas de corrente, para distância entre treliças maiores que 5 metros. | 68 |
| 3.18 | Representação gráfica das linhas de corrente em uma edificação, gerada automaticamente. | 69 |
| 3.19 | Representação dos pilares no Corte A-A. | 70 |
| 3.20 | Representação das terças no Corte A-A. | 70 |
| 3.21 | Representação das barras do banzo superior no Corte A-A. | 71 |
| 3.22 | Contraventamento dos pilares metálicos, em “X”. | 72 |
| 3.23 | Contraventamento dos pilares, onde foi necessária a introdução de uma longarina metálica. | 72 |
| 3.24 | Representação das barras do banzo superior e da terça no Corte B-B. . . . | 73 |
| 3.25 | Resultado final do Corte B-B. | 73 |
| 3.26 | Resultado final da rotina de duas águas. | 74 |
| 3.27 | Caixa de Diálogo do AutoCAD, pedindo os dados de entrada do programa. . | 75 |
| 3.28 | Dados de entrada da rotina de Treliças de Duas Águas. | 76 |
| 3.29 | Diferenças dos Tipos 1 e 2 da rotina de treliças de banzos paralelos. . . . | 76 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.30 | Localização de pontos importantes no desenho da treliça. | 78 |
| 3.31 | Projeto da treliça, ilustrando o ângulo entre as diagonais e banzos. | 79 |
| 3.32 | Novo arranjo das diagonais, aumentando o ângulo entre as diagonais e o banzo inferior. | 80 |
| 3.33 | Resultado final da rotina de banzos paralelos. | 81 |
| 3.34 | Caixa de Diálogo do AutoCAD, pedindo os dados de entrada do programa. | 82 |
| 3.35 | Funcionamento da teoria de coordenadas polares. | 84 |
| 3.36 | Localização dos pontos na treliça de arcos circulares. | 85 |
| 3.37 | Detalhe do PONTO 1. | 87 |
| 3.38 | Determinação do ângulo β | 89 |
| 3.39 | Geometria da treliça gerada automaticamente. | 90 |
| 3.40 | Novo arranjo da rotina de arcos circulares, gerado automaticamente. | 91 |
| 3.41 | Resultado final da rotina de arcos circulares. | 92 |
| 4.1 | Inserção dos dados de entrada, no AutoCAD. | 94 |
| 4.2 | Geração da geometria da treliça , no AutoCAD. | 95 |
| 4.3 | Geração do projeto básico, no AutoCAD. | 95 |
| 4.4 | Importação da Treliza, no AutoMETAL. | 96 |
| 4.5 | Tela do AutoMETAL, ilustrando a treliça importada. | 96 |
| 4.6 | Dimensionamento da estrutura, no AutoMETAL. | 97 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.7 | Relação da lista de materiais, com os perfis dimensionados. | 97 |
| 4.8 | Geometria e esforços para a ligação tipo “K”. | 98 |
| 4.9 | Verificação da ligação “K”. | 99 |
| 4.10 | Exportação para o ambiente CAD. | 99 |
| 4.11 | Arquivo de exportação gerado com sucesso. | 100 |
| 4.12 | Resultado final do detalhamento. | 100 |
| 5.1 | Caixa de Diálogo do AutoCAD, solicitando os dados de entrada da rotina. . | 102 |
| 5.2 | Representação gráfica do banzo. | 104 |
| 5.3 | Geração das diagonais na ligação. | 105 |
| 5.4 | Recomendação de corte. | 106 |
| 5.5 | Resultado final da rotina de detalhamento de ligações do tipo “K”. | 108 |
| 5.6 | Caixa de Diálogo do AutoCAD, solicitando os dados de entrada da rotina. . | 109 |
| 5.7 | Representação gráfica do banzo. | 111 |
| 5.8 | Geração das diagonais na ligação. | 112 |
| 5.9 | Resultado final da rotina de detalhamento de ligações do tipo “KT”. | 113 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Lista de variáveis para os dados de entrada, na rotina de treliças de duas águas. | 52 |
| 3.2 | Valores das variáveis para o exemplo da Fig. 3.13. | 63 |
| 3.4 | Valores das variáveis para o exemplo da Fig. 3.14. | 64 |
| 3.5 | Valores das variáveis para o exemplo da Fig. 3.15. | 65 |
| 3.6 | Lista de variáveis para os dados de entrada, na rotina de treliças de banzos paralelos. | 75 |
| 3.7 | Lista de variáveis para os dados de entrada, na rotina de treliças de arcos circulares. | 83 |
| 3.8 | Coordenadas de pontos no projeto da geometria da treliça. | 84 |

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Gerais

“Projeto estrutural deve ser definido como sendo uma mistura de arte e ciência, combinando o sentimento de intuição da experiência do engenheiro para o comportamento de uma estrutura com o legítimo conhecimento dos princípios de estática, dinâmica, resistência dos materiais e análise estrutural, com o objetivo de produzir uma estrutura econômica e segura a qual estará a serviço dos seus propósitos pretendidos [28]” .

Pode-se dizer que o desenvolvimento do projeto pode ser considerado como composto de duas partes: projeto funcional e projeto estrutural [28]. O projeto funcional é o projeto que assegura o funcionamento adequado da construção, como fornecer áreas adequadas de trabalho; fornecer ventilação e condicionamento de ar adequados; facilidades de transporte, tais como elevadores e escadas; projeto de para raios e, finalmente, possuir atrativos arquitetônicos. O projeto estrutural é a elaboração do arranjo e das dimensões dos elementos estruturais de modo que as ações sobre a estrutura sejam resistidas por esses elementos e transferidas adequadamente ao solo. O procedimento de projeto estrutural pode ser esboçado como se segue:

1. *Planejamento.* Estabelecimento das finalidades e características para que a estrutura deve servir. Ajuste dos critérios de acordo que para o projeto resultante seja otimizado.

2. *Configuração estrutural preliminar.* Disposição dos elementos estruturais para atender às funções da etapa 1.
3. *Estabelecimento das ações* que incidirão na estrutura.
4. *Seleção preliminar dos elementos.* Baseado nas decisões das etapas 1, 2 e 3, realizar a seleção dos perfis dos membros estruturais para satisfazer a um critério, tal como economia da obra, ou o menor peso, ou ambos.
5. *Análise estrutural.* Realizar a análise estrutural para verificar se os membros selecionados são seguros, mas não excessivamente. Isto incluiria verificar todos os esforços e fatores de estabilidade nos membros e nas suas conexões.
6. *Avaliação.* Todas as exigências são satisfeitas e o resultado está otimizado? Compare o resultado com os critérios predeterminados.
7. *Re-dimensionamento.* Repetição de qualquer parte da seqüência 1 a 6 em consequência da avaliação. As etapas 1 a 6 representam um processo *iterativo*. Geralmente, somente as etapas 3 a 6 deste texto estão sujeitas a esta iteração, já que a configuração estrutural e o carregamento externo são prescritos.
8. *Decisão final.* A determinação de que se obteve ou não a condição de projeto otimizado.

Portanto, seguindo essas recomendações e tomando os devidos cuidados, tem-se condições de elaborar um projeto que atenda aos requerimentos exigidos de uma maneira segura e econômica, competitiva com o mercado atual.

1.1.1 A Importância da Automação

Atualmente, vive-se em um mundo globalizado, movimentado por uma economia extremamente competitiva. Nos dias de hoje, quando se trata de Engenharia, o fator econômico é tão importante quanto o fator segurança. Por isso, para que o projeto estrutural seja viável, os procedimentos adotados na sua elaboração devem produzir um resultado final não só seguro, mas também econômico. Mesmo em um passado recente, o fator econômico também era fundamental. Em 1941, GRINTER afirmava: “Uma inevitável conclusão é que apenas um projeto econômico pode ser um bom projeto” [17].

Como foi mostrado no item anterior, o procedimento de realização do projeto estrutural é um processo iterativo e, sem dúvida, *repetitivo*. Portanto, uma das motivações desse trabalho foi automatizar e otimizar esse processo, tornando-o mais rápido e eficiente, diminuindo os custos e aumentando a produtividade.

1.2 Estado da Arte

Em 1998, BERTOLINO apresentou o Sistema Integrado para Análise, Dimensionamento e Desenho de Estruturas de Aço [9]. Este sistema é composto por uma série de programas desenvolvidos em diversas linguagens com o objetivo de automatizar e otimizar as etapas de um projeto estrutural metálico. Neste sistema, as rotinas de detalhamento foram desenvolvidas na linguagem AutoLISP, nativa do AutoCAD. O programa responsável pelo cálculo estrutural é o SAP 90, e foi desenvolvido um sistema integrado que gera automaticamente os arquivos de entrada para o programa.

Em 1999, BEER et al apresentaram um sistema CAD/CAE que tinha o objetivo de automatizar o projeto de uma estrutura metálica plana treliçada para coberturas de galpões em arco circular [8]. Este sistema possui uma primeira etapa, que tem a função de automatizar a geração da treliça plana e de todo o sistema de contraventamentos da estrutura atendendo aos dados de entrada do usuário, e uma segunda etapa, que tem a função de realizar o cálculo estrutural e o dimensionamento das barras do arco circular treliçado, verificando a estabilidade global da estrutura no regime elástico.

Este software foi desenvolvido em linguagem AutoLISP para produzir o projeto da estrutura, mostrando os desenhos da treliça em arco circular e da planta da estrutura com seus respectivos contraventamentos. Utilizando-se a mesma linguagem de programação, ainda foram desenvolvidas rotinas capazes de automatizar os carregamentos e suas combinações, segundo a Norma NBR8800/1986 - *Projeto e Execução de Estruturas de Aço em Edifícios* [1].

O programa tem início quando suas rotinas são devidamente carregadas e executadas dentro do AutoCAD. A tela inicial do programa mostra uma caixa de diálogo onde são introduzidos os seguintes dados de entrada:

- Vão livre do arco treliçado, em metros;
- Relação flecha vão f/L do arco;
- Distância entre banzos, em metros;
- Máxima distância entre terças, em metros;
- Altura dos pilares, em metros;
- Comprimento da estrutura, em metros;
- Distância entre pilares, em metros;
- Peso das terças, telhas e dos contraventamentos;
- Pressão do vento;
- Sobrecarga e os coeficientes de pressão e de forma externos que atuam na edificação.

Com esses dados, o programa executa o desenho do arco treliçado e da planta geral da estrutura de forma automática, conforme a Fig. 1.1.

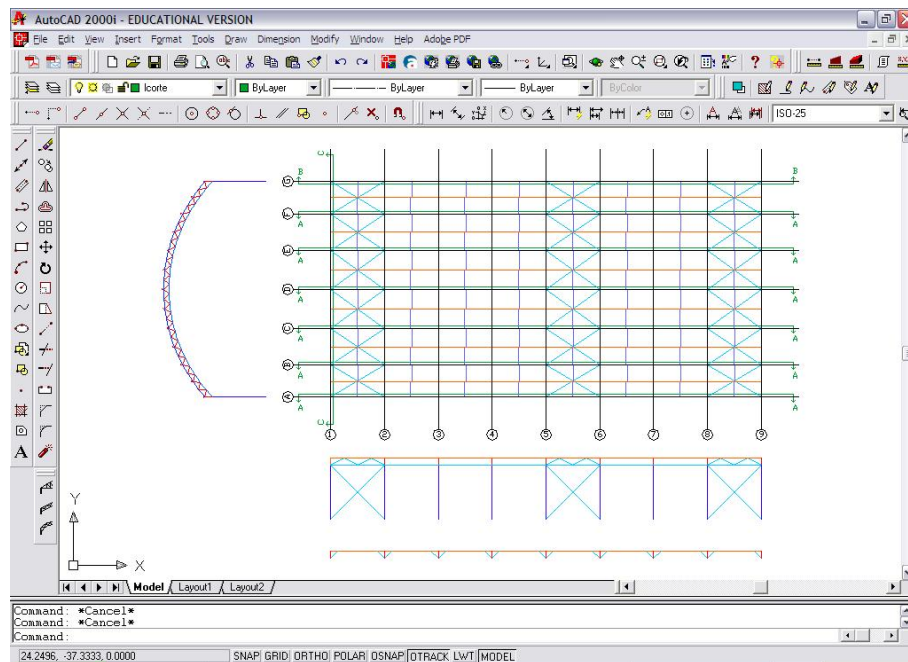


Figura 1.1: Geometria do arco treliçado e planta com os contraventamentos gerados automaticamente.

Em 2000, CALLEJAS et al apresentam o software *NLMETALdim* que calcula e dimensiona treliças metálicas planas [13]. No dimensionamento dos elementos estruturais, pode-se levar em consideração os efeitos de não linearidade geométrica e física do material. Esta possibilidade se deve ao fato de o programa, para análise estrutural, ter sido desenvolvido para a realização de análises não lineares. O dimensionamento dos elementos estruturais é baseado na NBR8800/1986 a qual estabelece critérios a serem utilizados no dimensionamento de uma estrutura de aço. Os tipos de dimensionamento que estão disponíveis no programa desenvolvido são: análise e dimensionamento no regime elasto-linear; análise e dimensionamento levando em conta os efeitos de não linearidade física do material e a análise e dimensionamento da estrutura levando em consideração os efeitos da não linearidade geométrica e física do material em conjunto.

Em 2000, REQUENA et al apresentaram uma implementação [22] ao software desenvolvido por BEER et al em 1999 [8]. Nessa etapa, o programa gera um arquivo de exportação para o programa *NLMETALdim* [13], que realiza o cálculo dos esforços, o dimensionamento das barras da estrutura e verifica sua estabilidade global.

Em 2001, BRANCO et al apresentam o software *DimLaminados* [12], que é capaz de automatizar e verificar o dimensionamento de elementos estruturais constituídos de perfis laminados de aço de acordo com as Normas NBR8800/1986, AISI - LRFD/1994 - *Load and Resistance Factor Design Especification* e Eurocode - 3/1993 - *Design of Steel Structures*. O programa realiza o dimensionamento dos elementos estruturais para as três normas citadas e apresenta os dados de volta ao usuário através de uma interface gráfica bastante agradável.

1.2.1 A Família AutoMETAL

Em setembro de 1999, SILVA et al apresentam o software *AutoMETAL 1.01 - UNICAMP* [30]. A primeira versão deste software é o resultado de um projeto de iniciação científica desenvolvido a partir de [21] sob a orientação dos Professores Doutores João Alberto Venegas Requena e Aloísio Ernesto Assan da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP.

Este software permite gerar geometrias otimizadas, lançar automaticamente as ações, calcular as solicitações nos elementos estruturais e também dimensionar os perfis desses

elementos de acordo com a Norma NBR8800/1986 - *Projeto e Execução de Estruturas de Aço em Edifícios*, obtendo o peso final de cada treliça metálica.

Nesta primeira versão, o software utiliza apenas perfis laminados e trabalha somente com estruturas treliçadas com nós perfeitamente rotulados. O AutoMETAL 1.01 - UNICAMP permite a geração das treliças utilizadas em projetos de estruturas metálicas: duas águas, arcos circulares, arcos parabólicos e arcos com inércia variável. A Fig. 1.2 mostra a tela do AutoMETAL 1.01 - UNICAMP, com uma treliça de duas águas gerada automaticamente, através dos dados de entrada do usuário.

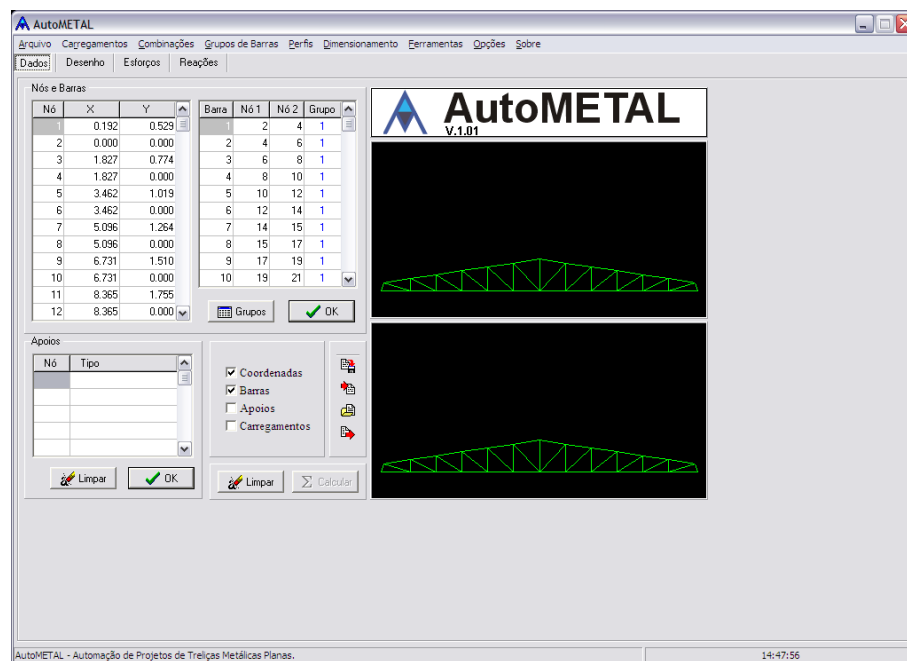


Figura 1.2: Tela principal do AutoMETAL 1.01 - UNICAMP, com a representação de uma treliça de duas águas.

O AutoMETAL 1.01 - UNICAMP também permite importar e exportar geometrias feitas no programa AutoCAD em arquivos de extensão *dxf*. Todos os dados dos projetos podem ser salvos, em qualquer instante, em arquivos compatíveis com os softwares SAP 90 e SAP 2000. As ações na estrutura, como peso próprio, forças devido ao vento e sobrecargas, também são obtidas automaticamente pelo programa. Com a treliça desenhada e com as ações devidamente posicionadas, o programa executa a análise estrutural e em seguida dimensiona os elementos estruturais, apresentando ao final a lista dos perfis selecionados.

Em 2000, foi apresentado um projeto com o objetivo de desenvolver e implementar novos recursos ao AutoMETAL 1.01 - UNICAMP. Com uma equipe que envolveu, além dos autores anteriores, a inclusão de novos colaboradores, REQUENA et al apresentam o programa *AutoMETAL 3.01 - UNICAMP*. Uma das novas implementações foi a inclusão do dimensionamento de perfis formados a frio [27] com base na Norma NBR 14762/2001 - *Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio - Procedimento* [3], feita pelo então aluno Amauri Gavazzi, que foi um dos novos colaboradores do projeto de pesquisa. Além disso, o programa apresenta a adição do elemento *pilar*, que é um elemento que necessita de três graus de liberdade, que são o deslocamento nas direções x e y e a rotação na direção z . Com isso, o software passa a trabalhar com barras rotuladas e treliçadas na cobertura e com pilares em barras de pórtico vinculadas às treliças. Isso implementa no programa o fato da rigidez do pilar ser diferente do restante da estrutura, o que influi na determinação dos esforços e altera o dimensionamento das barras.

A pesquisa resultou na elaboração do programa e de um manual de utilização, disponível em [25]. A Fig. 1.3 ilustra o programa AutoMETAL na sua versão 3.01 - UNICAMP.

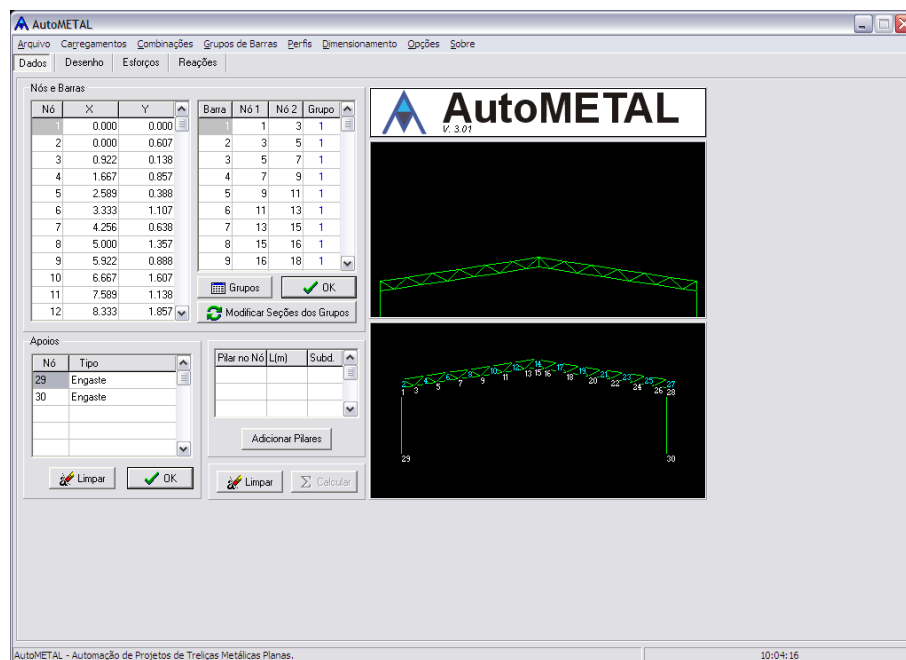


Figura 1.3: Tela do AutoMETAL 3.01 - UNICAMP, ilustrando os pilares na estrutura.

Em março de 2001, através de um programa de P&D por meio de um convênio realizado entre a UNICAMP e a siderúrgica *V&M do Brasil S. A.*, foi desenvolvida a pri-

meira versão do AutoMETAL exclusiva para a utilização de elementos com perfis tubulares laminados sem costura [26].

Essa nova versão do software tem como grande característica a implementação do acoplamento do cálculo de dimensionamento e do detalhamento das ligações. O programa *AutoMETAL 1.01 - V&M do Brasil - UNICAMP*, desenvolvido na linguagem Delphi5, dimensiona as ligações e transfere os dados para o módulo denominado “Detalhe”, programado na linguagem AutoLISP, que tem a tarefa de padronizar as ligações, determinar os tamanhos das chapas de ligação e representar graficamente o desenho em uma tela do AutoCAD, gerando a prancha de detalhamentos das ligações. A Fig. 1.4 mostra a tela do AutoMETAL 1.01 - V&M do Brasil - UNICAMP, relativo ao módulo de detalhamento do programa.

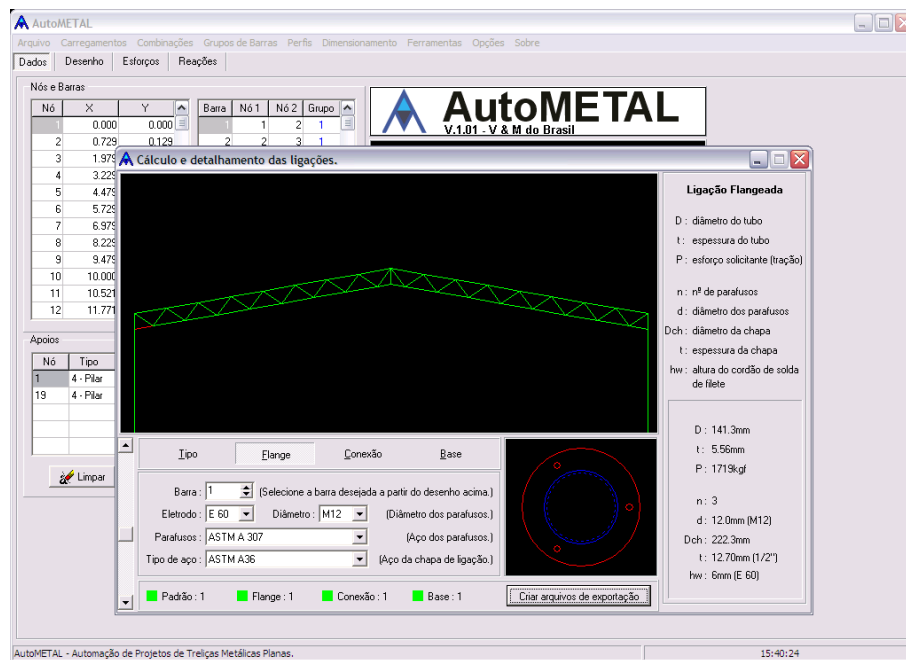


Figura 1.4: Tela do AutoMETAL 1.01 - V&M do Brasil - UNICAMP.

Em agosto de 2002, foi atualizada a família AutoMETAL: a versão *3.01 V&M do Brasil - UNICAMP* [11]. Novamente, essa versão foi realizada por um programa de P&D de um convênio entre a V&M do Brasil e a UNICAMP. A equipe de desenvolvimento do programa foi composta pelo Professor Doutor João Alberto Venegas Requena, pelo engenheiro Afonso Henrique M. de Araújo da V&M do Brasil e pelos alunos Nilto Calixto Silva, Luís Guilherme Paschoal Andrade, Renato Henrique Ferreira Branco e Rogério Mitsuo dos Santos. Essa versão implementou a capacidade de dimensionamento das barras por flexão composta e o dimensionamento de estruturas aporticadas, ao invés de treliçadas, como acontecia nas

versões anteriores. A Fig. 1.5 a seguir ilustra uma tela do AutoMETAL na versão 3.01 - V&M do Brasil - UNICAMP.

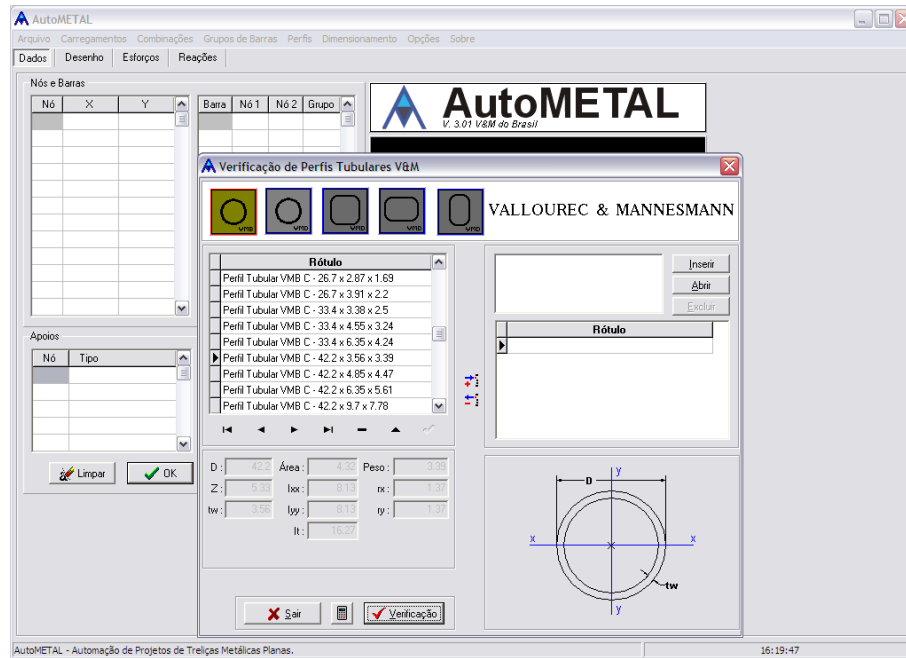


Figura 1.5: Tela do AutoMETAL 3.01 - V&M do Brasil - UNICAMP.

Em setembro de 2003, foi lançado mais uma atualização do AutoMETAL: a versão 4.1 - UNICAMP. Essa versão foi feita pelos primeiros autores do programa, Nilto Calixto Silva, Prof. Dr. João Alberto Venegas Requena e Prof. Dr. Aloísio Ernesto Assan, com a participação muito importante do então aluno de pós graduação Renato Henrique Ferreira Branco. Essa nova versão foi necessária para corrigir alguns erros encontrados na versão anterior do programa (AutoMETAL 3.01 - UNICAMP), além de implementar outros recursos, como a Norma NBR 6123/1987 - *Forças Devido ao Vento em Edificações* [2] na aplicação dos carregamentos automáticos na estrutura. A Fig. 1.6 ilustra uma tela do AutoMETAL 4.1 - UNICAMP.

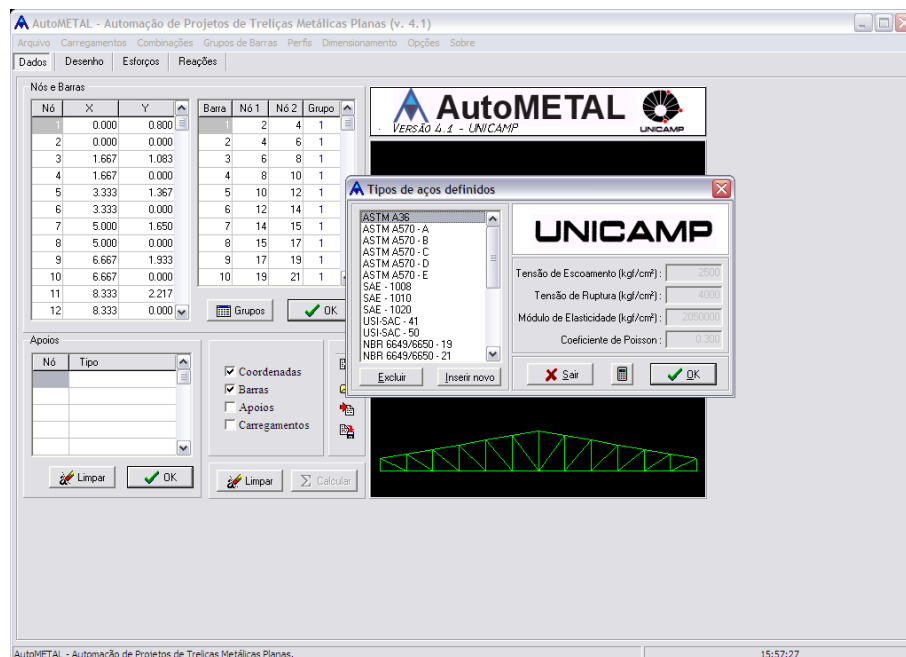


Figura 1.6: Tela do AutoMETAL 4.1 - UNICAMP.

Em 2004, BRANCO et al apresentam o programa *AutoMETÁLICA* (*versão experimental*) [10], que é a última versão dos programas da família AutoMETAL e inicia uma nova linha de pesquisa na automação e otimização estrutural. Essa nova vertente tem como objetivo automatizar as etapas que compreendem o projeto estrutural de uma forma mais abrangente, compreendendo o lançamento da geometria, o lançamento da planta de cobertura contendo todos os contraventamentos e linhas de correntes, o lançamento dos cortes da estrutura, o cálculo automático das ações provocadas pelo vento, o carregamento automático da estrutura e o cálculo e dimensionamento automático das barras.

Esse software, que está em fase de desenvolvimento através da parceria da V&M do Brasil com a UNICAMP, considera três graus de liberdade por nó e permite que as barras da estrutura sejam rotuladas em suas extremidades, através de uma interface gráfica bastante amigável.

1.2.2 A Família AutoVentos

Em 2000, com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, SAKURADA et al apresentam o software denominado *AutoVentos - Duas Águas*

[24]. Este programa automatiza o cálculo das ações do vento em edificações com telhados em duas águas, baseado nas especificações da NBR 6123/1987 - *Forças Devido ao Vento em Edificações*.

O programa, feito na linguagem Delphi5, pede como dados de entrada as informações relativas à edificação em estudo: suas dimensões, aberturas fixas e móveis em cada uma de suas faces, sua localização, que é usada para a determinação da velocidade básica V_0 e as características topográficas, para a determinação dos coeficientes S_1 , S_2 e S_3 , calculados automaticamente. O programa também calcula os coeficientes de pressão internos e externos para cada uma das paredes e das águas da estrutura. A Fig. 1.7 ilustra uma tela do programa AutoVentos - Duas Águas.

The screenshot shows the 'Geometria' window of the AutoVentos - Duas Águas program. The window title is 'Geometria'. The main area is titled 'Definição da Geometria - unidade: m (metro)'. It contains a diagram of a building with dimensions labeled: 'a' (total width), 'b' (total height), 'a1' (width of the first side), 'a2' (width of the second side), 'b1' (height of the first side), 'b2' (height of the second side), 'Za' (width of the first side at the base), and 'Zb' (width of the second side at the base). Below the diagram are input fields for 'a', 'b', 'a1', 'a2', 'b1', 'b2', 'Za', and 'Zb'. To the right of the diagram are radio buttons for 'zb' (with a unit '(metro)') and 'alpha' (with a unit '(graus)'), and a field for 'Distância entre pórticos ='. Below the diagram is a section titled 'Definição das Aberturas - unidade: m2 (metro quadrado)'. It contains two tables for defining openings. The first table is for side 'a' and the second is for side 'b'. Each table has columns for 'a1' or 'b1' and 'a2' or 'b2', and rows for 'móvel' and 'fixa aberta'. To the right of these tables are buttons for 'Saída', 'Limpa', and 'Continua'.

Figura 1.7: Tela do AutoVentos - Duas Águas, pedindo os dados de entrada da edificação.

Ainda em 2000, e também com o apoio da FAPESP, PRANDINI et al desenvolveram o programa *AutoVentos - Otimização* [24]. O programa automatiza e otimiza o cálculo das ações do vento em edificações de duas águas, sendo que para a determinação dos coeficientes de pressão internos, o programa utiliza o anexo D em substituição ao corpo principal da Norma NBR 6123/1987 - *Forças Devido ao Vento em Edificações*. Além disso, o programa permite otimizar alguns parâmetros para minimizar os carregamentos que seriam críticos para as situações de barlavento e sotavento. Como resultado, o programa exibe ao usuário

os quatro piores carregamentos de vento, dois a 0° e dois a 90° . A Fig. 1.8 ilustra uma tela do programa AutoVentos - Otimização, com o cálculo dos coeficientes externos das paredes para uma edificação qualquer.

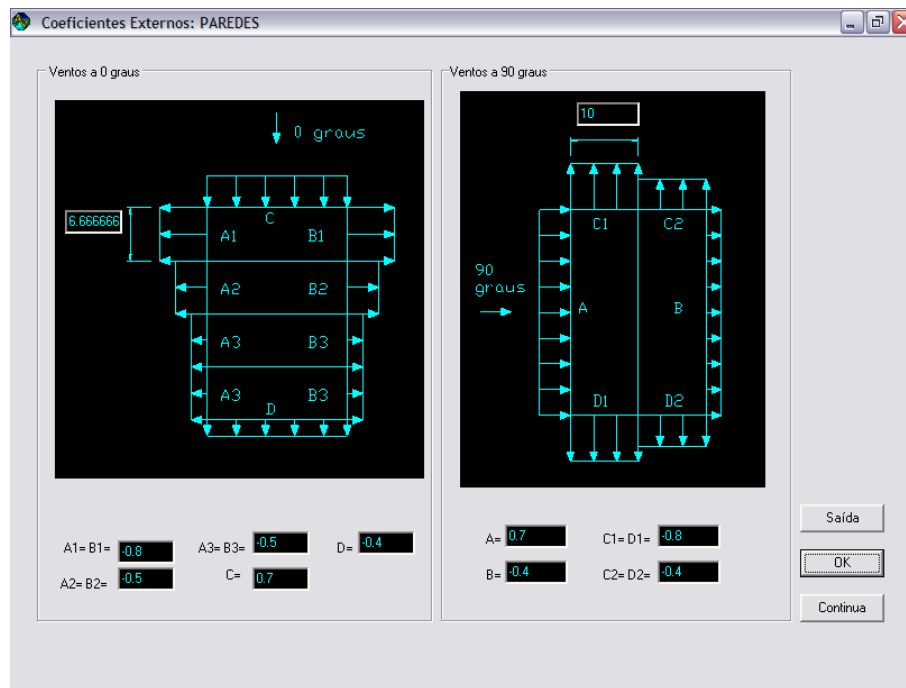


Figura 1.8: Tela do AutoVentos - Otimização, mostrando os resultados dos coeficientes externos das paredes.

Ainda em 2000, mas agora com o apoio do Serviço de Apoio ao Estudante - SAE da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, BRANCO et al desenvolveram o programa AutoVentos - Arcos, que automatiza o cálculo das ações do vento em edificações formadas por telhados em arcos, seguindo as recomendações da NBR 6123 - *Forças Devido ao Vento em Edificações* [23]. O programa pede como dado de entrada as dimensões da estrutura, as aberturas em cada face e os dados topográficos. Como resultado, o programa exhibe os coeficientes de pressão e forma externos e internos das paredes e do arco, em seis segmentos diferentes. O cálculo dos coeficientes externos é feito com base no anexo E da NBR 6123, que aborda o cálculo dos coeficientes externos para superfícies curvas, como o arco. A Fig. 1.9 ilustra uma combinação dos coeficientes externos e internos em um arco qualquer, mostrando cada segmento do arco em questão.

Soma dos Coeficientes Externos e Internos

Diagrama do arco com coeficientes: C1, C2, C3, C4, C5, C6 (superfície superior) e P1, P2 (superfície inferior).

Os valores mostrados com a cor **VERMELHA** são valores de compressão, ou seja, os quais submetendo a região em que estão atuando a um efeito de compressão.
 Os valores mostrados com a cor **AZUL** são valores de sucção, ou seja, os quais submetendo a região em que estão atuando a um efeito de sucção.

| Combinação | Vento a 0 graus | Vento a 90 graus |
|--------------|--|---|
| Combinação 1 | P-1: -0.8, P-2: -0.8, C-1: -0.8, C-2: -0.8, C-3: -0.8, C-4: -0.8, C-5: -0.8, C-6: -0.8 | P-1: 0.7, P-2: -0.5, C-1: -1.2, C-2: -0.5, C-3: -0.4, C-4: -0.4, C-5: -0.4, C-6: -0.3 |
| Combinação 2 | P-1: 0.18, P-2: 0.18, C-1: 0.18, C-2: 0.18, C-3: 0.18, C-4: 0.18, C-5: 0.18, C-6: 0.18 | P-1: 1.4, P-2: 0.2, C-1: -0.5, C-2: 0.2, C-3: 0.3, C-4: 0.3, C-5: 0.3, C-6: 0.4 |

Botões: Sair, Voltar, Continuar

Figura 1.9: Combinação dos coeficientes externos e internos de um arco.

Finalmente em 2000, também com o apoio do SAE da UNICAMP, ODAN et al desenvolveram mais um programa da família AutoVentos, a versão AutoVentos - Shed [23]. Da mesma maneira que os outros programas, o AutoVentos - Shed automatiza o cálculo das ações do vento em edificações seguindo as recomendações da NBR 6123 - *Forças Devido ao Vento em Edificações*, agora para estruturas do tipo shed. Os dados de entrada do programa são as dimensões da estrutura, a distância entre as traves e entre a viga mestra, as aberturas fixas e móveis em cada face e os dados topográficos da edificação. A Fig. 1.10 ilustra o programa AutoVentos - Shed, na sua tela inicial, pedindo os dados de entrada ao usuário.

Definição da Geometria

Geometria

a = [] (m)

b = [] (m)

☐ Zb = [] (m)

☐ alpha = [] (°)

Dist. entre VM = [] (m)

Dist. entre Traves = [] (m)

Observação:
 -O ângulo alpha está limitado entre 10 e 30 graus;
 -O módulo hachurado pode se repetir ao longo da estrutura (caso haja mais que 4 dentes-de-serra).

Za = [] (m)

Definições das Aberturas : Áreas (m2)

| | | móvel = | |
|---|----|------------------------------------|-----|
| a | a1 | [] | [] |
| | | fixa aberta = | [] |
| | a2 | móvel = | [] |
| | | fixa aberta = | [] |
| b | b1 | móvel = | [] |
| | | fixa aberta = | [] |
| | b2 | móvel = | [] |
| | | fixa aberta = | [] |
| | b3 | Abertura fixa na Viga Mestra = [] | |

Saída

Limpa

Continua

Figura 1.10: Tela inicial do AutoVentos - Shed, pedindo os dados de entrada ao usuário.

O programa calcula automaticamente os coeficientes S_1 , S_2 e S_3 , e os coeficientes externos e internos nas faces da edificação, para ventos à 0° , 90° e 180° , este último justificado pelo fato do carregamento a 180° gera uma condição de carregamento diferente da encontrada com o vento a 0° . No final, o programa exhibe os seis carregamentos críticos da edificação, sendo que dois para 0° , dois para 90° e dois para 180° .

Em 2003, FORTI et al desenvolveram o mais recente programa da família AutoVentos, o AutoVentos - Torres [15]. Este programa tem a capacidade de automatizar o carregamento de vento em torres, determinando a pressão de obstrução e a velocidade característica através dos fatores topográficos S_1 , S_2 e S_3 . As análises são realizadas pelo programa tanto para o método estático quanto para o método dinâmico simplificado, apresentados na NBR 6123.

O programa também é capaz de automatizar a geração das geometrias de torres quadradas e triangulares utilizadas para telecomunicações, podendo exportá-las para arquivos de extensão *dxf*. A Fig. 1.11 ilustra esse caso, mostrando os dados de entrada necessários para a geração de uma dessas torres.

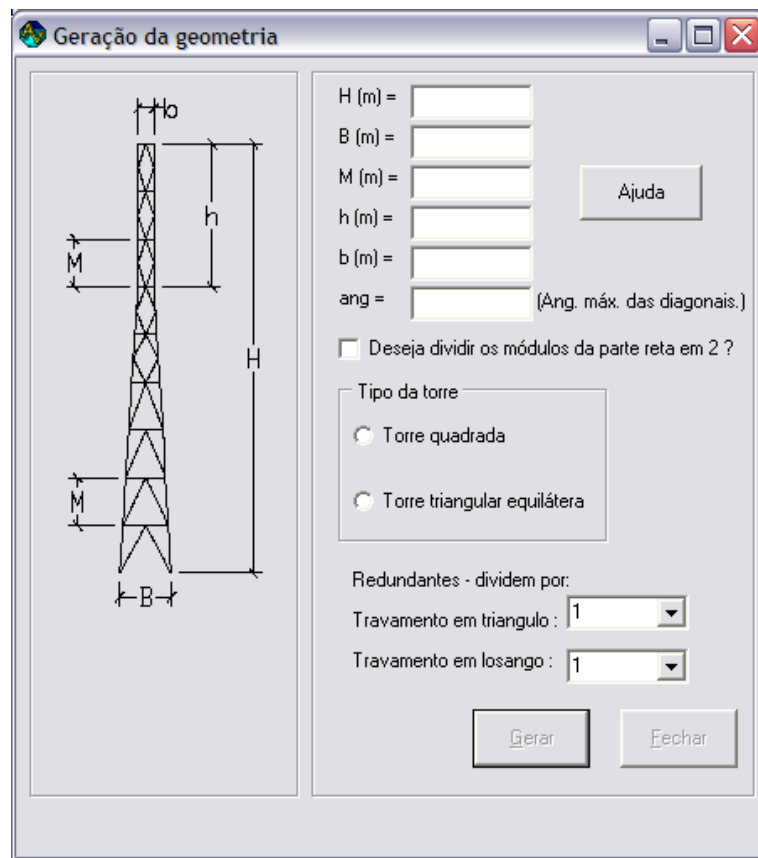


Figura 1.11: Tela do AutoVentos - AutoTorres, pedindo os dados de entrada para a geração automática de uma torre de telecomunicações.

Ao final das análises, todos os resultados podem ser exportados para um arquivo texto. São exportados os resultados parciais, além das forças de arrasto nos nós dos diafragmas.

1.2.3 Programas Comerciais

Existe no mercado uma série de softwares de automação do projeto de estruturas metálicas. Esses programas automatizam o projeto estrutural, seja realizando o dimensionamento automático das estruturas, ou o detalhamento automático de ligações, juntas, placas de base, chumbadores, etc. A maioria desses programas possuem ferramentas extremamente poderosas, o que na maioria das vezes acarreta em um custo enorme para a maioria dos engenheiros, projetistas ou estudantes de engenharia.

Esse sub-capítulo tem como objetivo apresentar alguns desses softwares, em âmbito nacional, que devem ser tomados como referência para o desenvolvimento de programas como o que está sendo apresentado neste trabalho.

A *Stabile Engenharia LTDA* é uma empresa localizada em Porto Alegre, no Rio Grande do Sul, que atua no mercado de Engenharia Estrutural desde 1975, com trabalhos em vários países da América do Sul. Em 1994, a Stabile iniciou o desenvolvimento de um programa para projeto e detalhamento de estruturas metálicas, para uso próprio, com o objetivo de automatizar tarefas cotidianas.

Aceitando o desafio de compartilhar esse software com todo o mercado de estruturas metálicas, foi lançado em janeiro de 1998 o *ST_CadEM v.1.0*. Após uma série de atualizações, foi lançado em dezembro de 2003 a mais recente versão, o ST_CadEM 4.0. O sistema formado pelo ST_CadEM 4.0 é um conjunto de programas, desenvolvidos dentro da plataforma AutoCAD, que visa ao aumento da produtividade, a diminuição da incidência de erros de desenho e a conseqüente diminuição de custos de desenvolvimento e revisão de desenhos.

A nova versão do ST_CadEM apresenta as seguintes vantagens:

- Integração com programas de cálculo e dimensionamento, como o SAP, o STRAP e o METÁLICAS 3D;
- Tecnologia *Pick & Know*, ou seja, com um simples clique do mouse, o sistema reconhece o perfil criado (tipo de perfil, dimensões e orientação);
- Módulo de detalhamento de treliças, capaz de realizar croquis de fabricação das barras com um simples clique.

Além disso, o ST_CadEM apresenta outros recursos, como a representação gráfica de uma série de perfis, chumbadores, bases de pilares, emendas de perfis, terças, contraventamentos, etc. O programa também apresenta um módulo em seu interior chamado “Plano de Terças”, capaz de desenhar a vista superior da cobertura e fachadas para obras com planta quadrilátera qualquer. O módulo desenha coberturas em uma e duas águas, em arco e em tipo shed, com opção para a implementação de lanternim. A Fig. 1.12 ilustra uma tela do programa ST_CadEM.

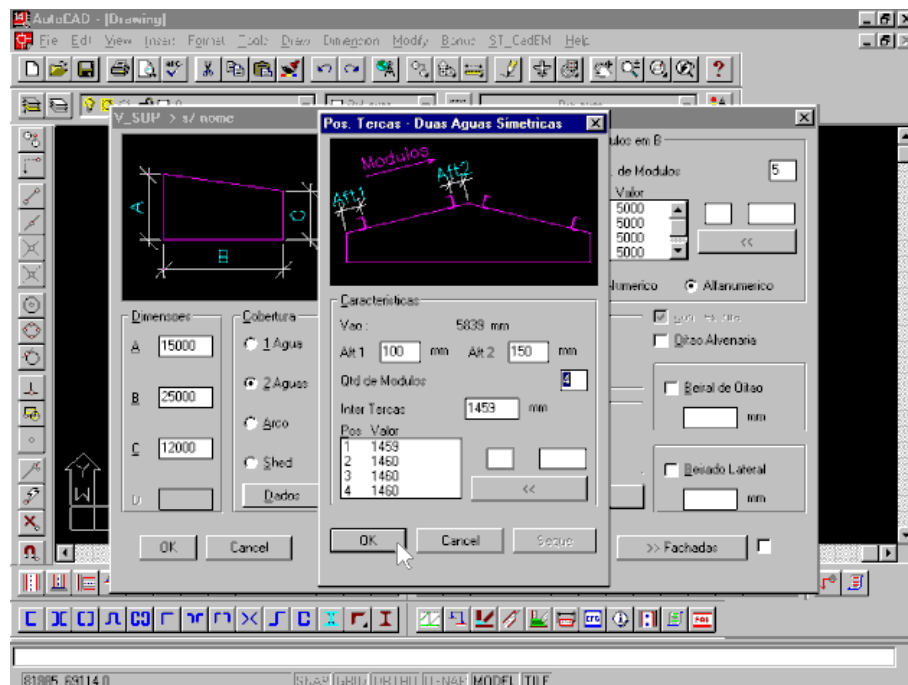


Figura 1.12: Tela do ST_CadEM.

Além do ST_CadEM, a Stabile Engenharia LTDA também desenvolveu outro programa, chamado *mCalc*, que é um software de geração, análise e dimensionamento de estruturas metálicas, que está integrado ao ST_CadEM. Atualmente, o programa está na versão 1.8 e é capaz de analisar sistemas reticulados de aço, permitindo seu dimensionamento, utilizando perfis laminados, soldados e perfis formados a frio.

Algumas características que estão implementadas no módulo de entrada de dados do programa são:

- Editor gráfico interativo com comandos semelhantes ao AutoCAD;
- Geração automática de diversas treliças;
- Importação de geometrias pelo AutoCAD.

Após a inserção dos dados, o programa analisa a estrutura declarada através do método da Rigidez Direta. A estrutura pode ser composta por elementos de treliça e de pórtico plano simultâneos.

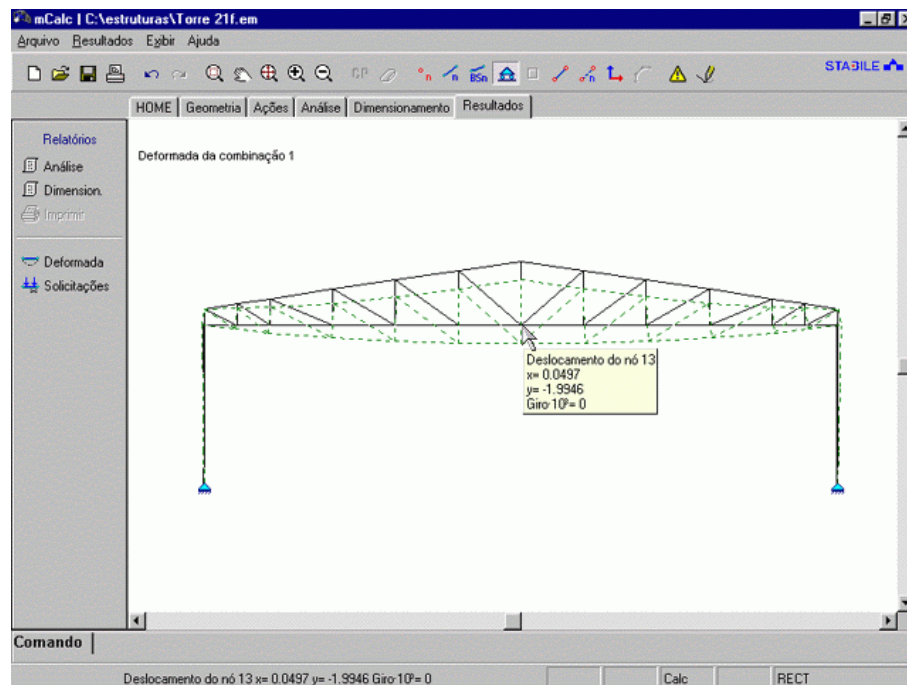


Figura 1.13: Deslocamento do nó 13 visualizado na tela do programa.

O programa também conta com um módulo de dimensionamento, que segue as recomendações das Normas NBR 14762/2001 - *Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio - Procedimento* para perfis formados a frio e a NBR 8800/1986 - *Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios* para perfis laminados e soldados. Encontram-se implementados os procedimentos para verificação de barras comprimidas e tracionadas de perfis formados a frio com geometrias usuais, além de cantoneiras e perfis tipo “U” laminados e vigas “I” soldadas e laminadas. No módulo de dimensionamento, o programa também realiza a verificação de vigas-colunas para diversos perfis.

Após o dimensionamento, o programa entra no módulo denominado *Resultados*, que é capaz de gerar um relatório com os dados da geometria, ações e tabela de envoltória de máximos e mínimos, deslocamentos e reações de apoio para as combinações especificadas. O relatório final do programa apresenta também os perfis adotados e o desenho da deformada da estrutura para cada combinação de ações, com os deslocamentos dos nós selecionados. A Fig. 1.13 ilustra o deslocamento encontrado no eixo de simetria (nó 13) de uma treliça de duas águas.

Além disso, o mCalc apresenta integração completa com o ST_CadEM: a estrutura gerada, analisada e dimensionada será exportada completamente, com a geometria e com

os perfis adotados, para o módulo de detalhamento. O programa também pode exportar os dados para um arquivo de extensão *dxf* que pode ser interpretado pelo AutoCAD.

Em janeiro de 2004, a STABILE Engenharia LTDA lançou mais um software no mercado: o *mCalc3D*. Esse programa é capaz de gerar automaticamente treliças espaciais, automatizar o lançamento das cargas e analisar e dimensionar a estrutura, utilizando perfis laminados, soldados e formados a frio. O software possui um módulo de geometria que contém um editor gráfico interativo em três dimensões, com comandos semelhantes aos do AutoCAD. O programa possui também a capacidade de importar arquivos do AutoCAD através de arquivos de extensão *dxf*.

Após a geração automática da treliça e o lançamento automático das cargas, o programa parte para o módulo denominado análise, onde a matriz de rigidez da estrutura é montada. O programa usa o método da Rigidez Direta, com a montagem da matriz de rigidez com reordenação nodal para a otimização da semi-largura de banda e a solução do sistema de equações é feita através do método de Gauss otimizado.

Em seguida, o programa parte para o módulo chamado dimensionamento, onde o programa sistematiza as orientações das Normas NBR 14762/2001 - *Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio - Procedimento* para perfis formados a frio e NBR 8800/1986 - *Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios* para perfis laminados e soldados. O processo de dimensionamento é realizado de forma parametrizada e iterativa, utilizando-se qualquer combinação de perfis. O programa também possui um comando denominado AutoDimens, que realiza o dimensionamento automático da estrutura ou de um grupo de barras pelo critério do menor peso. A cada barra dimensionada o programa informa a performance do perfil, com a relação entre a solicitação e a resistência do perfil testado.

Em seguida, o programa passa para o módulo resultados, que é o responsável por gerar um relatório com todos os resultados, incluindo o desenho da deformada da estrutura para cada combinação de ações, com a apresentação do deslocamento do nó selecionado.

A Stabile Engenharia LTDA também desenvolveu um software para o cálculo de ligações: o *mCalcLIG*. Esse software, lançado em maio de 2004, pode ser encarado como uma calculadora de ligações: escolhe-se o tipo de ligação, informam-se os dados da ligação e as solicitações de cálculo, e o programa verifica a ligação gerando uma memória de cálculo.

O programa trabalha com ligações soldadas e parafusadas, emendas de perfis e bases de pilares. Ao todo, o programa contém 14 grupos de ligações, com variantes dentro de cada grupo, contemplando 39 diferentes tipos de ligações, emendas e bases de pilares. Está em desenvolvimento um módulo de integração entre o mCalcLIG e o software ST_CadEM, que no futuro permitirá o detalhamento automatizado da ligação calculada.

A empresa MULTIPLUS Softwares Técnicos é a responsável por desenvolver alguns dos mais respeitados programas de computador capazes de realizar o detalhamento de estruturas metálicas, incluindo ligações soldadas e parafusadas, juntas, placas de base, chumbadores, etc., que pertencem à família *TecnoMETAL*. <http://www.bondfaro.com.br/cd.html?text=ziggy+stardust>

A família *TecnoMETAL* inclui ao todo três programas: *TecnoMETAL 2D*, *TecnoMETAL 4D* e finalmente o *TecnoMETAL EL*, que serão descritos a seguir.

O programa *TecnoMETAL EL* é um software para o detalhamento completo de estruturas metálicas, incluindo pilares, vigas, contraventamentos, ligações, placas de base, etc. O programa também possui rotinas para a geração de torres, mezaninos, escadas, plataformas e outros. Além disso, o programa realiza a lista de materiais detalhada. Uma de suas principais características é a automação do detalhamento: o programa inicia-se com barras unifilares com as dimensões exatas para fabricação. A seguir, o usuário deve selecionar as ligações, juntas, placas de base e os perfis de uma extensa biblioteca paramétrica e o detalhamento é feito automaticamente.

O software *TecnoMETAL 2D* também realiza o detalhamento automático de estruturas metálicas, com alguns recursos extras. O programa é compatível com o AutoCAD e permite até seis opções de vista diferentes. O programa realiza o detalhamento de nervuras e possui uma extensa biblioteca de perfis, que incluem perfis de alma variável, perfis castelados, etc. O software realiza ao todo 14 diferentes tipos de ligações, 16 tipos de juntas, 10 tipos diferentes de placas de base, etc. A Fig. 1.14 ilustra uma tela do *TecnoMETAL 2D*, que ilustra os dados necessários para que o programa realize um detalhe de uma ligação de uma treliça. São pedidos as distâncias entre os perfis, o tipo dos perfis utilizados, a posição das presilhas, etc.

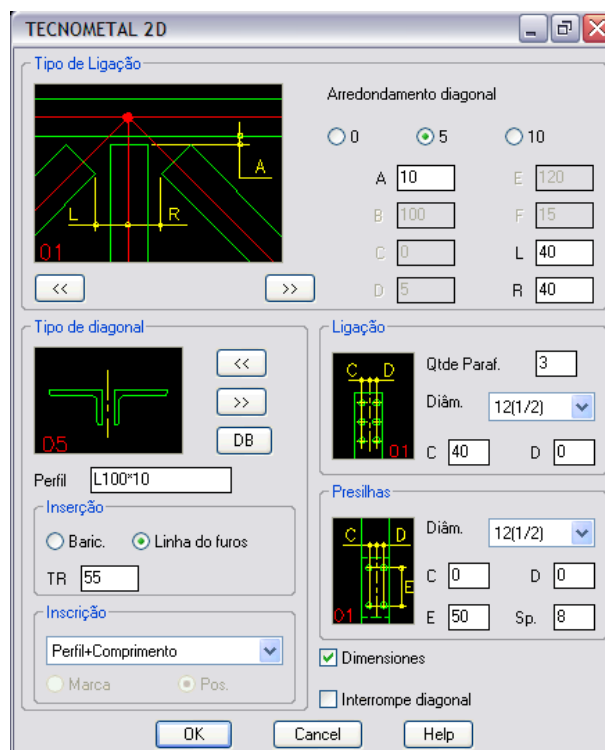


Figura 1.14: Tela do TecnoMETAL 2D.

O último programa e último lançamento da família TecnoMETAL é o TecnoMETAL 4D. Esse software tem a capacidade de criar um modelo sólido da estrutura lançada, contendo inclusive chanfros, parafusos, etc. O usuário lança a estrutura, as ligações e as placas de base diretamente em 3D, o programa processa os dados de entrada e devolve a estrutura modelada com todos os detalhes, com a lista de materiais completa, croquis de fabricação, etc. O software também realiza a visualização interativa da estrutura com sombra e luz, o desenho de projetos de elevações, o desenho das cotas, etc.

1.3 Proposta de Trabalho

Com o objetivo de automatizar o projeto de estruturas formadas por coberturas de treliças metálicas planas constituídas de barras com perfis tubulares laminados, de acordo com a Norma Brasileira NBR 8800/1986, foi desenvolvido uma família de programas computacionais em convênio com a empresa *V & M do Brasil S.A.*

O projeto em desenvolvimento é um sistema CAD/CAE, que automatiza a criação das geometrias de estruturas planas aporticadas formadas por perfis tubulares além de representações gráficas do sistema geral da estrutura de cobertura com seus respectivos contraventamentos - CAD; exporta os dados para um programa integrado que realiza um processo otimizado de toda a análise estrutural e todo o dimensionamento - CAE e, finalmente, o retorno dos dados processados no CAE para o ambiente CAD, que realiza o detalhamento automático das ligações típicas da estrutura treliçada analisada. O ambiente CAE utilizado será o AutoMETAL 1.01 - V&M do Brasil UNICAMP, que já foi concluído em 2001[26].

Desta forma, essa tarefa será composta de cinco etapas: (i) geração automática de geometrias; (ii) lançamento automático da planta da estrutura, com as treliças, terças, contraventamentos e cortes; (iii) exportação dos dados da estrutura para o programa CAE, já existente, que realiza o dimensionamento da estrutura; (iv) importação dos dados calculados no CAE de volta ao ambiente CAD e, finalmente, (v) detalhamento básico das ligações. Nesta última etapa, entende-se o detalhamento automático das ligações típicas encontradas nas treliças estudadas, ou seja, as do tipo “K”, “N” e “KT”.

Para o desenvolvimento da família de rotinas foram utilizadas duas linguagens de programação: o AutoLISP, linguagem nativa do AutoCAD, e o Object Pascal, através do software Delphi5. A primeira linguagem tem como objetivo desenvolver o sistema CAD, para definições e representações gráficas, enquanto que a segunda tem como objetivo principal desenvolver as rotinas do sistema CAE, para análise estrutural e dimensionamento da estrutura.

O programa desenvolvido em Delphi5 e o programa em AutoLISP trabalham de forma integrada, para que o objetivo final de automação e otimização dos projetos sejam alcançados de forma ágil, precisa e amigável, permitindo que em pouco tempo de trabalho o projetista possa estudar diversas soluções e escolher a mais adequada.

O sistema CAD/CAE em desenvolvimento tem como principal objetivo disseminar a tecnologia do uso de estruturas de aço constituídas de perfis tubulares, automatizando todo o desenvolvimento de um projeto estrutural completo. Além disso, o programa será uma alternativa para engenheiros, projetistas e estudantes de estruturas metálicas que não estão dispostos a comprar softwares de elevado custo presentes no mercado, alguns deles já descritos no item 1.2.3.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

2.1 Das Barras Tubulares de Aço na Estrutura

Atualmente, o uso de estruturas metálicas tubulares nos países de primeiro mundo vem sendo disseminado por arquitetos e engenheiros, que aproveitam as inúmeras vantagens deste tipo de estrutura para desenvolver seus projetos, conforme ilustra a Fig. 2.1.

São inúmeras as vantagens das estruturas tubulares. Dentre elas, pode-se citar sua alta eficiência estrutural, que devido à sua forma geométrica, proporciona soluções mais econômicas. Além disso, as estruturas tubulares permitem a execução das mais variadas obras, com soluções leves e econômicas, devido à sua alta resistência e baixo peso próprio.

Pode-se citar também a capacidade que as estruturas metálicas tubulares têm de vencer grandes vãos. A estrutura metálica tubular, constituída de barras de perfis circulares, tem a capacidade de ser construída por barras mais longas, o que diminui a quantidade de ligações na estrutura, já que nos perfis circulares, os raios de giros são iguais em todas as direções. Conseqüentemente, esse tipo de estrutura tem maior facilidade de vencer grandes vãos com mais facilidade, quando comparadas com outras soluções metálicas ou análogas em concreto ou madeira. Além disso, o uso de estruturas tubulares permite o uso de estruturas mistas, fazendo-se o seu preenchimento interno com concreto, que é uma solução bastante vantajosa principalmente no caso de pilares, pelo fato de aumentar sua resistência mecânica e a resistência ao fogo.

Outra vantagem do uso de estruturas metálicas tubulares é o fator estético, já que esse tipo de estrutura traduz um aspecto de arrojo e modernidade, como pode-se ver na Fig. 2.1, que ilustra o Terminal I do Aeroporto da cidade de Stuttgart, na Alemanha:



Figura 2.1: Foto do Terminal I do Aeroporto Internacional de Stuttgart, Alemanha. Adaptado de [31].

Os perfis tubulares metálicos podem ser classificados em função do seu processo de fabricação em dois tipos: perfis tubulares *com costura* e perfis tubulares *sem costura*. Os perfis com costura são aqueles obtidos pela transformação de uma chapa metálica em um tubo, ou seja, trata-se de um processo mecânico, onde a chapa metálica é conformada continuamente até tornar-se um tubo metálico. Esse processo pode ser feito em três diferentes formas: pela calandragem ou pela prensagem das chapas, por soldagem por arco submerso e pela conformação contínua com soldagem por eletrofusão [14].

O processo por calandragem permite a obtenção de virolas das mais variadas espessuras. Entretanto, dada a limitação do comprimento dos cilindros desses equipamentos, o perfil, no comprimento desejado, será obtido pela justaposição de topo das virolas, soldadas umas às outras. Emprega-se como matéria-prima chapas pré-cortadas de acordo com o comprimento admissível do equipamento. Existem diferentes tipos de calandras, da manual à hidráulica, ambas compreendendo três rolos, dois inferiores e um superior que, dependendo

das características técnicas, podem possibilitar o deslocamento horizontal e vertical dos rolos, permitindo inclusive que sejam cambiáveis. A fabricação de um tubo por este sistema está limitada na largura pelo comprimento nominal da calandra, que é praticamente igual à do rolo, e pelo diâmetro mínimo de calandragem, em que são consideradas outras variáveis, como espessura da chapa e tipo de material. De uma maneira geral, são encontradas nas fábricas de estruturas calandras que permitem larguras de chapas variando de 1900 a 4000 milímetros.

O processo por prensagem e soldagem a arco submerso das chapas de aço destina-se principalmente à produção de tubos pesados, para aplicação de gasodutos, oleodutos, transporte de água e para serem empregados em fins estruturais. O processo consiste basicamente em fazer passar a chapa de aço por duas prensas: a primeira, que pode aplicar uma força de até 1000 toneladas, faz com que a chapa adquira a forma de um “U”; na seqüência, a segunda prensa, com capacidade de até 32.000 toneladas irá dar a curvatura final ao tubo. A força a ser empregada leva em conta o diâmetro, a espessura e o grau de resistência do material a ser utilizado. Posteriormente, as extremidades das chapas serão soldadas interna e externamente pelo sistema de arco submerso.

O processo de produção contínua trata-se do processo de soldagem por resistência elétrica. Na linha de produção contínua, o aço é processado em bobinas. O processo tem início pela etapa do desbobinamento, passando pela de pré-formação, de soldagem, de tratamento térmico, de acabamento e de inspeção do tubo. A primeira etapa para transformação do tubo consiste em uma série de rolos pré-conformadores, de diferentes formatos e tamanhos, que vão dando o formato inicial do tubo à medida que a chapa de aço passa pelos roletes. Na última etapa da pré-formação, é feita a soldagem do tubo na placa de solda. Essa soldagem induz uma campo elétrico de alta frequência nas bordas do material e, por efeito de caldeamento, ocorre a fusão dessas bordas. Assim, o processo consiste em aquecer as duas bordas da chapa e, enquanto aquecidas, exercer pressão mecânica uma contra a outra, executando a união sem metal de adição. No final, o tubo pode passar para uma seção quadrada, mediante uma pressão lateral nas suas paredes superior e inferior, transformando-as em superfícies planas de cantos arredondados.

Os tubos sem costura são produzidos por processo de laminação a quente, a partir de bloco maciço de seção redonda de aço, o qual será laminado e perfurado por mandril, obtendo-se dessa maneira, suas dimensões finais. São resfriados em leito de resfriamento, até temperatura ambiente, e, por possuírem uniforme distribuição de massa em torno de seu

centro, mantém temperatura praticamente constante ao longo de todo o seu comprimento e em qualquer ponto de sua seção transversal. Por esse motivo, possuem baixo nível de tensões residuais, o que os distingue dos tubos de aço com costura. A região afetada termicamente pelo processo de soldagem possui níveis de tensões residuais diferentes das demais regiões da seção transversal do tubo, também tencionada devido ao processo de calandragem e expansão. Tal uniformidade encontrada nos tubos sem costura conduz a uma melhor performance do aço em seu emprego estrutural [5].

O processo de produção de tubos sem costura utilizados pela V&M do Brasil é totalmente integrado: inicia-se pela conversão do minério de ferro e do carvão vegetal (proveniente de áreas reforestadas), em ferro gusa e aço de elevado grau de pureza. As barras de aço maciças são laminadas a quente em barras de seção circular nos diâmetros de 180, 194 e 230 milímetros. Em seguida são transformados em tubos sem costura com diâmetros variando de 26,7 a 177,8 milímetros por um Laminador Contínuo (RK) e de 168,3 a 355,6 milímetros por um Laminador Automático (LA); as espessuras de parede variam de 2,30 a 38,0 milímetros. São produzidos com aços estruturais de média resistência mecânica (VMB 250 e VMB 300), com aços de alta resistência mecânica (VMB 350) e também com aços com alta resistência à corrosão atmosférica (VMBcor). A linha de produtos é complementada pelos tubos de seções quadradas e retangulares conformados a frio, com dimensões nominais variando de 50 x 50 a 410 x 410 milímetros para os quadrados e de 60 x 40 a 360 x 225 milímetros para os retangulares, com espessuras de parede variando de 4,0 a 12,7 milímetros [14].

A Figura 2.2 ilustra o fluxo do processo dos tubos sem costura da V&M do Brasil desde o ferro gusa até o produto final.

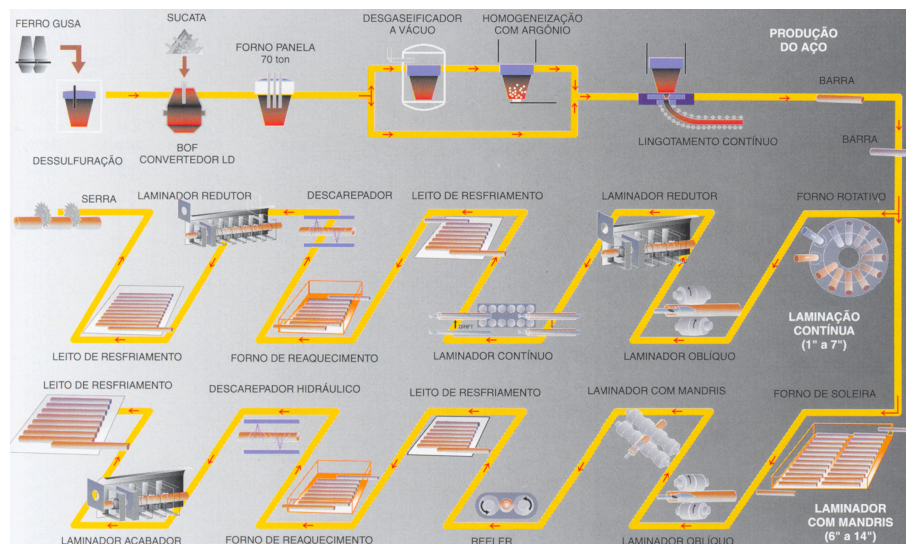


Figura 2.2: Fluxo do processo dos tubos sem costura da V&M do Brasil. Adaptado de [14].

2.2 Das Treliças nas Estruturas

Treliças são sistemas estruturais formados por barras rotuladas na sua extremidade caracterizadas por atuarem somente a forças axiais às barras, isto é, paralelos ao seu eixo longitudinal, sejam eles de tração ou de compressão. São formados basicamente por banzos superiores, banzos inferiores, diagonais e montantes. As treliças, juntamente com os pilares, formam um pórtico plano, que dependendo de suas vinculações, podem ser hiperestáticos ou isostáticos.

O uso de treliças é mais eficiente em situações de grandes vãos e alturas consideráveis de pilares, já que nesses casos, torna-se anti-econômico o emprego de vigas de almas cheias. Isso se deve ao fato de que o peso das barras da treliça é menor do que o peso de vigas com alma cheia. No entanto, para pequenos vãos, o uso de vigas com alma cheia é mais econômico, devido ao maior trabalho na execução das barras das treliças, que possuem ligações mais complexas [29].

As treliças podem ser classificadas em dois tipos: planas ou espaciais. No caso de treliças planas, as barras que formam sua estrutura estão contidas em um único plano, e por consequência, as ações estão contidas neste mesmo plano. No caso de treliças espaciais, tanto as barras quanto as ações podem estar em qualquer direção e sentido.

As treliças planas podem ser classificadas em vários tipos, dependendo da forma do arranjo entre suas barras.

Neste trabalho, serão estudadas treliças planas de diferentes tipos: duas águas, banzos paralelos, arcos circulares e parabólicos.

2.2.1 Treliças Planas e Configurações das Barras

Como já foi apresentado neste trabalho, as treliças planas são classificadas conforme a disposição das barras que formam sua estrutura. Este sub-capítulo tem o objetivo de fazer uma breve apresentação dos principais arranjos e das principais vantagens de cada um deles.

2.2.1.1 Treliças de Duas Águas

As treliças de duas águas são formadas por banzos superiores inclinados e simétricos, por barras perpendiculares ao eixo do vão livre chamadas de montantes, por banzos inferiores, que podem ou não ser inclinados, e por diagonais que ligam todo o sistema. A Fig. 2.3 mostra uma treliça genérica de duas águas.

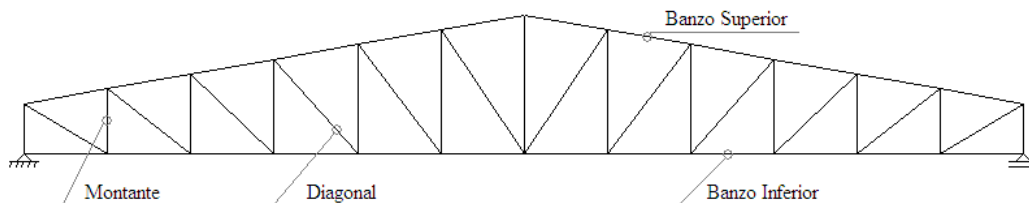


Figura 2.3: Treliça de Duas Águas.

Devido ao arranjo das barras, as traves com um banzo inclinado têm esforços nos banzos com pequenas variações, o que permite melhor aproveitamento do material. Os esforços nas diagonais e montantes são diminuídos. Treliças que possuem diagonais descendentes, como a Fig. 2.3, no caso de carregamento permanente regular, têm todas as diagonais tracionadas e todos os montantes comprimidos.

Existem treliças que não possuem o primeiro montante, ou seja, os nós iniciais e finais da treliça são formados por uma barra do banzo superior e outra do banzo inferior. Nesses casos, as treliças com diagonais segundo a inclinação da Fig. 2.4 são chamadas de treliças *Howe*. As treliças com as diagonais segundo a Fig. 2.5 são chamadas de treliças *Pratt*. Treliças *Howe* e *Pratt* são usadas principalmente em vãos livres de médio porte, devido a economia obtida no seu dimensionamento, comparando-as com outras modulações [19].

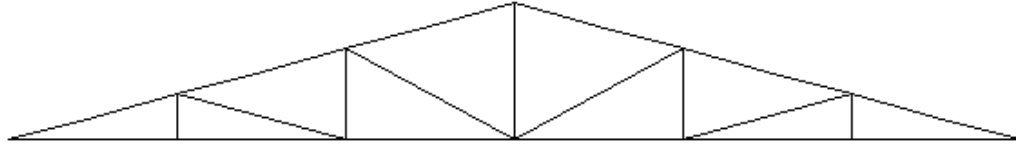


Figura 2.4: Treliça *Howe*.

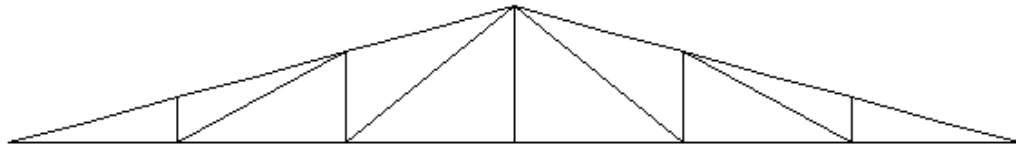


Figura 2.5: Treliça *Pratt*.

Para treliças, o ângulo ideal da inclinação das diagonais é da ordem de 45° [29]. Isso ocorre por que nesses casos, os esforços se distribuem de uma maneira mais uniforme pela treliça, levando a um melhor aproveitamento no dimensionamento dos perfis. No entanto, em treliças de duas águas, os ângulos entre as diagonais e os banzos variam da primeira até a última barra. Por exemplo, podemos observar que em treliças como a da Fig. 2.3, o ângulo cresce à medida que nos aproximamos do centro de simetria da treliça, que corresponde ao meio do vão livre. Por esse motivo, pode-se recomendar um intervalo de ângulos entre 30° e 60° , que levarão a um dimensionamento mais econômico.

2.2.1.2 Treliças de Banzos Paralelos

Treliças de banzos paralelos são formadas por banzos superiores e inferiores paralelos, com a mesma inclinação, unidos por diagonais ascendentes e descendentes que ligam o sistema. A Fig. 2.6 ilustra uma treliça formada por banzos paralelos.

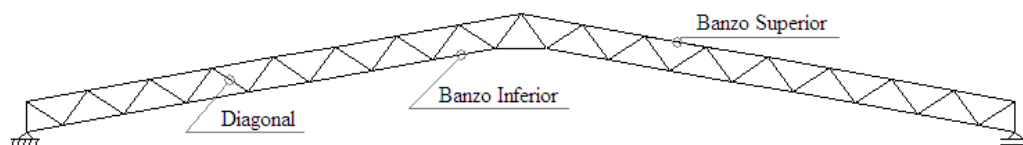


Figura 2.6: Treliça de Banzos Paralelos.

Treliças de banzos paralelos que tem o mesmo arranjo das barras ilustrado pela Fig. 2.6 apresentam a mínima soma dos comprimentos das barras, a menor quantidade de nós e o mais curto percurso dos esforços. Dessa forma, essas estruturas geralmente apresentam pesos próprios inferiores aos encontrados nas treliças de duas águas com semelhantes características, aumentando a economia da construção. Por outro lado, treliças de banzos paralelos apresentam um maior custo de fabricação, devido ao fato de apresentarem mais ligações em comparação com treliças de duas águas com características semelhantes.

Essas treliças são caracterizadas principalmente pelo seu vão, pela inclinação dos banzos, e pela distância entre banzos. O ângulo ideal da inclinação entre as diagonais e os banzos é de 45° [29], em que a distribuição dos nós das terças é compatível com o comprimento das telhas. Nos casos onde os banzos paralelos são relativamente afastados, o ângulo ideal é superior a 45° . Ao contrário, ou seja, nos casos de treliças com pequena distância entre banzos, o ângulo ideal é inferior a 45° .

Além disso, como os banzos superior e inferior são paralelos, a altura da treliça no meio do vão é pequena, proporcionando um maior espaço interno e dessa forma, ela é recomendada para construções que exijam grandes espaços internos livres.

2.2.1.3 Treliças de Arcos Circulares

Treliças de arcos circulares são utilizadas para a cobertura de médios e grandes vãos, sendo caracterizadas por apresentarem relativamente pequeno peso próprio quando comparada com os outros correspondentes tipos de estruturas. Este fato ocorre devido à redução dos momentos fletores atuantes nas seções transversais do arco, resultantes de sua forma e de seus sistemas estruturais. A Fig. 2.7 mostra uma treliça formada por arcos circulares convencional.

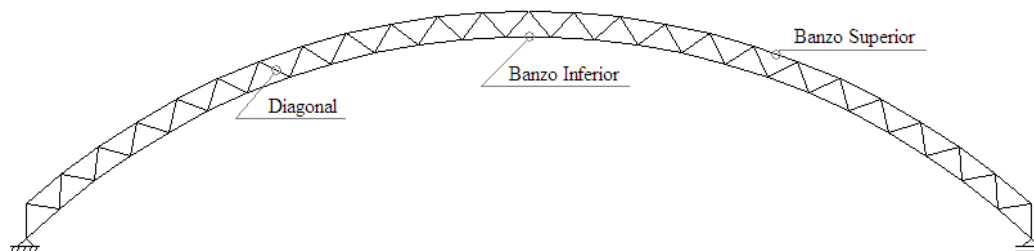


Figura 2.7: Treliça de Arcos Circulares.

Quanto ao sistema estático, os arcos podem ser classificados em tri-articulados, bi-articulados e bi-engastados.

A determinação de um desses sistemas estruturais depende das condições de apoio existentes para o arco. Assim, o arco tri-articulado, pelo fato de ser isostático, é adequado para casos em que os seus apoios estarão sujeitos a recalques resultantes da má qualidade do solo. Se as condições de apoio são tais que permitem um engastamento das extremidades do arco a um custo relativamente baixo, poderá ser utilizado um sistema estrutural bi-engastado; se estas condições de apoio puderem absorver os empuxos laterais e as reações, a solução ideal é o arco bi-articulado. Não havendo condições externas para suportar esse empuxo lateral (no caso dos pilares serem muito flexíveis) utilizam-se arcos atirantados. O tirante entretanto apresenta a desvantagem de obstruir parcialmente o espaço interno disponível, podendo-se reduzir este efeito ligando pontos intermediários do arco. Além disso, os arcos atirantados só funcionam para carregamentos gravitacionais que provocam esforços de tração nos tirantes. Logo, arcos atirantados não servem para estruturas com inversão de carregamentos, como no caso dos ventos de sucção nas coberturas.

Os arcos são caracterizados basicamente pelo seu vão livre, por sua flecha máxima e pela distância entre banzos. Geralmente, a relação entre a flecha e o vão da treliça varia em torno de $1/6$ e $1/5$, podendo aumentar até $1/2$ em alguns casos particulares.

Deve-se verificar que o ângulo entre os banzos e as diagonais esteja entre 45° e 60° , para que se obtenha uma boa distribuição dos esforços nas diagonais. A relação entre a altura e o vão livre deve ficar entre $1/60$ e $1/40$ para grandes vãos, e $1/40$ e $1/30$ para pequenos vãos.

Pode-se executar arcos com alturas variáveis ao longo de seu comprimento, com o objetivo de se economizar aço, conseguindo-se estruturas mais leves.

Para os arcos tri-articulados, que são isostáticos, o ideal sob o ponto de vista estrutural é uma altura que vá aumentando das extremidades para os pontos intermediários, que estão submetidos aos maiores esforços de momento. Já nos arcos bi-engastados ocorre exatamente o contrário, e os maiores momentos estão localizados nas extremidades do arco, onde a altura deve ser portanto maior. Para os arcos bi-articulados, pode-se manter constante a altura nos trechos centrais, e reduzi-la nas extremidades.

Todas estas considerações de variações de alturas são válidas para arcos com grandes vão (acima de 30 metros). Já nos arcos com vãos menores, que são os casos aqui estudados, costuma-se manter a altura constante em todo o seu comprimento, uma vez que a economia de aço que se consegue com esta variação não chega a justificar a execução mais trabalhosa que estas características implicam.

2.2.1.4 Treliças de Arcos Parabólicos

Treliças de arcos parabólicos, assim como as de arcos circulares, são utilizadas para a cobertura de médios e grandes vãos. A treliça é formada por banzos que descrevem uma curva parabólica, com diagonais unindo o sistema. A Fig. 2.8 mostra uma treliça formada por arcos circulares convencional.

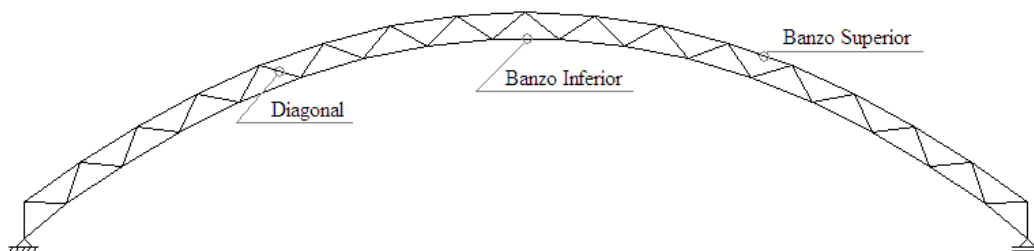


Figura 2.8: Treliça de Arco Parabólico.

A forma do arco parabólico tem a vantagem de anular completamente os esforços fletores provocados pelo carregamento da estrutura, por coincidir exatamente com a linha de pressões. Além disso, coberturas que utilizam arcos parabólicos são ideais na utilização de

ginásios ou construções que exijam grandes espaços internos livres. Outra vantagem dessas estruturas é o aspecto arquitetônico, já que esse tipo de estrutura está sempre associado à modernidade. Entretanto, a forma circular continua a ser a mais utilizada de uma maneira geral pelo fato de exigir projeto e execução extremamente mais simples do que a parabólica.

Da mesma forma que os arcos circulares, os arcos parabólicos podem ser classificados em tri-articulados, bi-articulados e bi-engastados. São caracterizados pelo vão livre, pela relação flecha vão e pela distância entre banzos. Assim como nos arcos circulares, recomenda-se que o ângulo entre as diagonais e os banzos esteja entre 40° e 60° .

2.3 Dos Contraventamentos nas Estruturas

A natureza das estruturas metálicas, constituídas de elementos comprimidos e de dimensões transversais relativamente pequenas, exige cuidados especiais para garantir a estabilidade desses elementos e do conjunto [29].

As treliças planas são formadas por barras de seções simples ou compostas. Estas traves, ligadas entre si pelos contraventamentos ou pelas estruturas transversais, constituem o conjunto da estrutura. Contraventamentos são elementos estruturais metálicos, geralmente leves e finos, que garantem a estabilidade da estrutura, além de diminuir o comprimento de flambagem das barras comprimidas dos banzos, levando a um dimensionamento mais econômico e seguro.

As condições acima são geralmente satisfeitas pela colocação de contraventamentos entre as partes da estrutura. Os contraventamentos devem garantir:

- Limitação dos comprimentos de flambagem das barras;
- Estabilidade das traves isoladas e do conjunto;
- Resistência às forças acidentais que agem fora do plano das traves principais.

As Figuras 2.9, 2.10 e 2.11 ilustram possíveis arranjos de barras de contraventamentos para as treliças planas, realizando o contraventamento horizontal do banzo superior e os contraventamentos horizontais e verticais do banzo inferior.

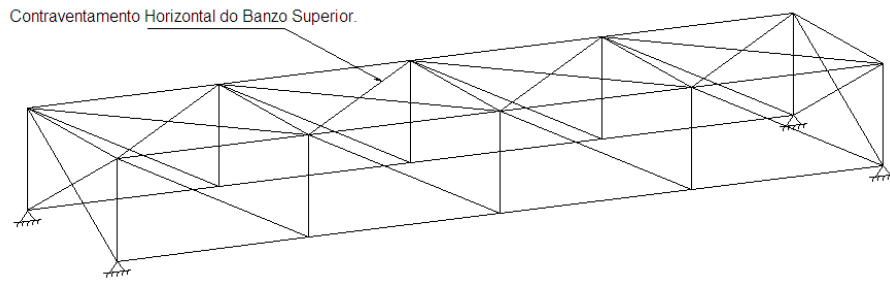


Figura 2.9: Contraventamento horizontal do banco superior.

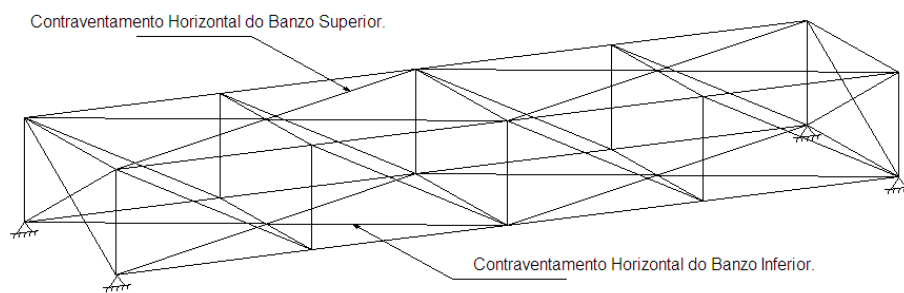


Figura 2.10: Contraventamentos horizontais dos bancos inferior e superior.

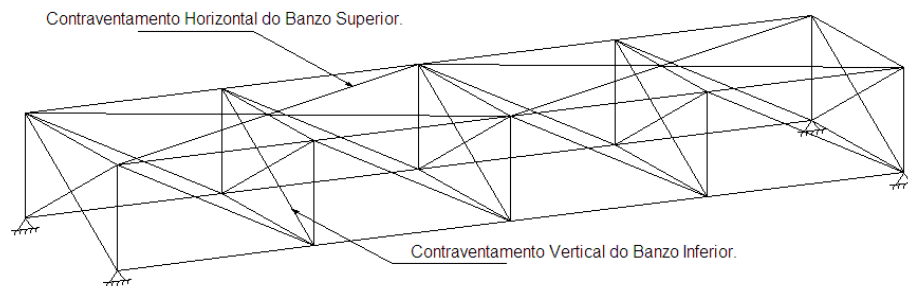


Figura 2.11: Contraventamento horizontal do banco superior e vertical do banco inferior.

Quando mal executados ou mal projetados, os contraventamentos podem ser responsáveis pelo encarecimento da obra, pois a esbeltez das barras pode tornar-se excessiva exigindo perfis muito pesados, mesmo quando os esforços solicitantes de compressão forem pequenos. Ou seja, peças muito longas e comprimidas podem flambar para esforços muito pequenos.

Para se obter o dimensionamento econômico de uma barra do banzo superior da treliça, deve-se contraventá-la de forma a obter uma relação entre os índices de esbeltez [†] das barras, no plano da treliça e no plano perpendicular à treliça, praticamente iguais. Isso será possível conhecendo a relação dos raios de giração dos perfis adotados no banzo superior, em relação aos eixos correspondentes ao plano da treliça e perpendicular ao mesmo. Para se obter o mesmo índice de esbeltez nos referidos planos, basta definir os comprimentos de flambagem das barras compatível com os raios de giração dos perfis adotados. No caso de perfis circulares, os quais possuem raios de giração iguais nos dois eixos, ou seja, $r_x = r_y$, a igualdade dos índices de esbeltez λ_x e λ_y é obtida através da igualdade dos comprimentos de flambagem em x e y , ou seja, $l_{fl_x} = l_{fl_y}$, dada a Eq. 2.1.

$$\lambda_x = \frac{l_{fl_x}}{r_x} \text{ e } \lambda_y = \frac{l_{fl_y}}{r_y}$$

Para perfis tubulares circulares temos $r_x = r_y$, logo $\lambda_x = \lambda_y$ resulta em

$$l_{fl_x} = l_{fl_y}, \quad (2.1)$$

tal que

$$l_{fl_x} = l \rightarrow \text{comprimento da barra do banzo;}$$

$$l_{fl_y} = x \cdot l, \quad (2.2)$$

onde $x \cdot l$ é a distância entre pontos fixos de contraventamentos.

Como l_{fl_x} é o comprimento de cada barra do banzo superior, que define a flambagem no plano da treliça, obtém-se o comprimento de flambagem em y , l_{fl_y} , como sendo igual ao

[†]*Índice de Esbeltez* é definido como a razão entre o comprimento livre de flambagem em um plano e o raio de giro da seção neste mesmo plano. Ou seja, $\lambda_x = l_x/r_x$ e $\lambda_y = l_y/r_y$.

comprimento da barra no plano perpendicular ao da treliça através do contraventamento de barra em barra no plano perpendicular ao da treliça. Portanto, de acordo com a Eq. 2.2, para perfis tubulares, x vale 1.

Construtivamente, os contraventamentos horizontais das treliças são compostos de tirantes em “X” compostos geralmente por barras delgadas circulares com esticadores, “montantes” compostos pelas terças, e finalmente “banzos”, compostos pelas próprias barras dos banzos das treliças, compondo assim, a treliça horizontal. Porém, não são todas as geometrias de treliças (duas águas, banzos paralelos, arcos circulares, etc.) que têm terças posicionadas em todos os nós. Em muitos casos, as terças são posicionadas a cada duas barras do banzo superior. Portanto, para que se possa lançar uma padronização dos contraventamentos em estruturas tubulares, optou-se neste trabalho por contraventar sempre a cada duas barras, de modo a garantir a existência de uma terça (“montante” da treliça horizontal) em nosso sistema estrutural.

Apesar de não ser a melhor relação λ_x e λ_y para estruturas tubulares circulares, uma vantagem é o fato de que o ângulo formado entre as barras do contraventamento são maiores que mais eficientes quando colocados de duas em duas barras comparando com de uma em uma barra. Além disso, o sistema geral de contraventamento será mais econômico, já que menos barras (e conseqüentemente menos ligações) serão utilizadas.

2.4 Do AutoCAD e do AutoLISP

O AutoCAD é um dos programas CAD (*Computed Aided Design*) mais utilizados no mundo, e foi desenvolvido com o intuito de constantemente aumentar a atividade das ferramentas de desenhos e projetos geométricos disponíveis aos profissionais desta área [6]. Seu sucesso fez com que milhares de profissionais substituíssem suas antigas ferramentas de desenho (como por exemplo régua paralela, escalímetros, esquadros, etc.) por um computador.

A primeira versão do AutoCAD [6] foi lançada na Mostra de Comércio COMDEX, em Las Vegas, EUA, em novembro de 1982. Desde então, passando por diversas versões, lançadas geralmente a cada ano, o AutoCAD tornou-se um *best-seller* mundial.

Uma das maiores vantagens do AutoCAD é o fato dele ser “um sistema aberto, que permite uma série de alterações em seu ambiente de modo a facilitar a interação com o usuário” [16]. Desse modo, um usuário pode criar comandos dentro do AutoCAD, facilitando seu uso, automatizando certas operações e aumentando sua produtividade. Para isso, é necessário ao usuário programar uma rotina que realize essa operação. O AutoLISP é a linguagem de programação que se opera dentro de AutoCAD para realçar e adaptar suas habilidades nativas. É fornecido sem custo adicional como um componente padrão do AutoCAD.

A linguagem de programação AutoLISP deriva-se da linguagem LISP, que foi criada no final da década de 50 por um grupo de pesquisadores liderados por John McCarthy no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) [7]. O LISP, abreviação para *LISt Processing*, é a segunda mais antiga linguagem de programação de alto nível ainda usada por computadores modernos. No início dos anos 60, o principal dialeto do LISP era o LISP1.5. Então, muitos dialetos e execuções diferentes para vários computadores apareceram, como BBNLISP, *InterLISP*, *MacLISP*, *NIL*, *FranzLISP*, etc. Os anos 70 e início dos anos 80 mostraram o desenvolvimento dos computadores conhecidos como “Máquinas LISP”, que eram computadores que foram projetados especificamente para rodar programas de LISP.

Em 1981, muitos programadores de LISP começaram juntos a identificar os aspectos comuns de determinados dialetos, e assim criaram o *Common LISP*. Em 1984, o *Common LISP* foi considerado a linguagem padrão de programação em LISP. O *Golden Common LISP* foi desenvolvido do *Common LISP* para o PC da IBM, e David Betz desenvolveu o XLISP, que é o dialeto o qual o AutoLISP é baseado.

O AutoLISP é um descendente direto do dialeto XLISP. De fato, o AutoLISP pode ser considerado um subconjunto e um *superset* de XLISP. É um subconjunto, já que não inclui todas as funções contidas em XLISP, e ao mesmo tempo é um *superset*, já que contém muitas funções não encontradas em XLISP. Estas funções adicionadas permitiram que o AutoLISP interagisse com a base de dados do AutoCAD. Entretanto, no conceito, na sintaxe e no estilo de programação, o LISP (mais especificamente o XLISP) é claramente o progenitor do AutoLISP.

O AutoLISP foi incluído no AutoCAD pela primeira vez na versão 2.18 (de janeiro de 1986). Embora crescesse, o AutoLISP manteve sua continuidade sobre os anos: a cada nova versão que é lançada do AutoCAD é possível esperar encontrar algumas funções novas do AutoLISP. Naturalmente, essas novas funções e o aprimoramento das funções antigas são

sempre bem vindos. Eles representam o crescimento da linguagem e raramente transformam funções antigas em obsoletas. Na maioria das vezes, as funções antigas trabalham da mesma maneira na última versão e nas versões anteriores. De fato, quando comparado com sistemas operacionais, o AutoLISP é um dos aspectos mais consistentes de AutoCAD.

O AutoLISP pode ser usado de duas maneiras principais. Primeiramente, o AutoLISP pode automatizar procedimentos repetitivos: isso economiza o tempo do usuário e pode eliminar muitos erros. Além disso, o AutoLISP pode aprimorar o AutoCAD, dando-lhe novos comandos e novas características.

2.5 Das Ligações nas Estruturas

2.5.1 Considerações Gerais

O termo ligação, freqüentemente encontrado no estudo das estruturas metálicas, refere-se a todos os detalhes construtivos que promovam a união de partes da estrutura entre si ou a sua união com elementos externos a ela, como, por exemplo, as fundações [18].

As ligações compõem-se dos elementos de ligação e dos meios de ligação. Os elementos de ligação são todos os componentes incluídos no conjunto para permitir facilitar a transmissão dos esforços. São exemplos de elementos de ligação os enrijecedores, placas de base, perfis tubulares, cantoneiras, chapas de gusset, talas de alma e de mesa, etc. Os meios de ligação são os elementos que promovem a união entre as partes da estrutura para formar uma ligação. São exemplos de meios de ligação as soldas, os parafusos e barras roscadas, etc.

O cálculo do dimensionamento de uma ligação compreende a verificação de todas as partes que a compõem, ou seja, os elementos de ligação e os meios de ligação.

De acordo com a NBR-8800/1986 [1], os elementos de ligação e os meios de ligação deverão ser dimensionados de forma que as suas resistências de cálculo, correspondentes aos estados limites em consideração, sejam maiores que as solicitações de cálculo.

Estruturas metálicas de uma forma geral, especialmente as que possuem os elementos de ligação formados através de perfis tubulares, devem ser projetadas de modo que o número de ligações seja minimizado [20]. Tratando-se de treliças planas, é extremamente importante que o engenheiro projetista considere o comportamento das ligações desde o início, na fase de planejamento 1. O projeto de treliças realizado apenas em função do carregamento pode resultar em um mau projeto, já que as ligações interferem radicalmente no fator econômico do projeto estrutural.

2.5.2 Classificação das Ligações

As ligações podem ser classificadas basicamente em cinco diferentes formas: segundo a rigidez, segundo os meios de ligação, segundo os esforços solicitantes, segundo o local de fabricação e finalmente segundo a geometria da ligação.

Segundo a rigidez, uma ligação pode ser rígida, semi-rígida ou flexível, dependendo da sua capacidade de impedir a rotação relativa local das peças ligadas. Ligações rígidas são aquelas as quais o ângulo formado entre os elementos estruturais que se interceptam permanece essencialmente o mesmo após o carregamento da estrutura, com uma restrição à rotação da ordem de 90 por cento ou mais daquela teórica necessária à ocorrência de nenhuma rotação, como pode-se observar na Fig. 2.12.

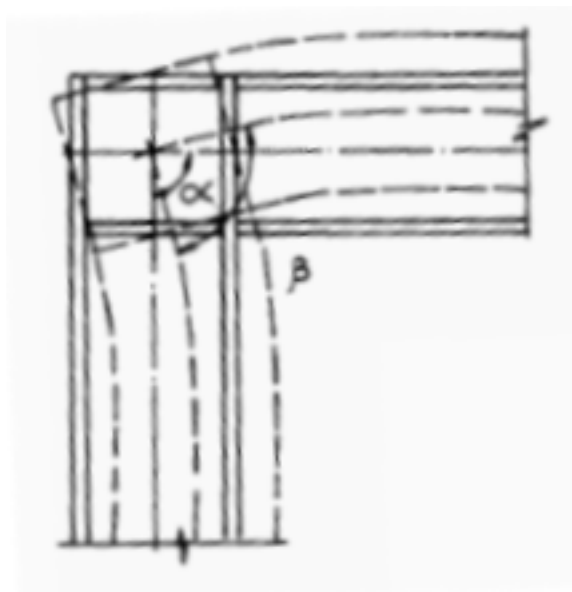


Figura 2.12: Exemplo de Ligação Rígida. Adaptado de [18].

A ligação pode ser considerada flexível se a rotação relativa entre as partes, após o carregamento, atingir 80 por cento ou mais daquela teoricamente esperada caso a conexão fosse totalmente livre de girar. Nas ligações semi-rígidas, a restrição à rotação está entre 20 e 90 por cento daquela teoricamente necessária para evitar qualquer rotação. Nesses casos, o momento transmitido através da conexão não é zero (ou próximo de zero) como nos casos de ligações flexíveis e nem o momento máximo (ou próximo dele) como no caso de ligações rígidas.

Segundo os meios de ligação, as ligações podem ser soldadas e/ou aparafusadas, sendo que, na maioria das vezes, o cálculo da ligação implica na verificação de grupos de parafusos e de linhas de solda [18]. Os parafusos devem resistir a esforços de tração e/ou cisalhamento, ao passo que as soldas devem resistir a esforços de tração, compressão e/ou cisalhamento. Em treliças, especialmente as dos tipos analisadas nesse trabalho, o meio de ligação mais utilizado é a solda.

Segundo os esforços solicitantes, as ligações podem ser dos seguintes tipos básicos [18]:

- Cisalhamento centrado 2.13;
- Cisalhamento excêntrico 2.14;
- Tração ou compressão 2.15;
- Tração ou compressão com cisalhamento 2.16.

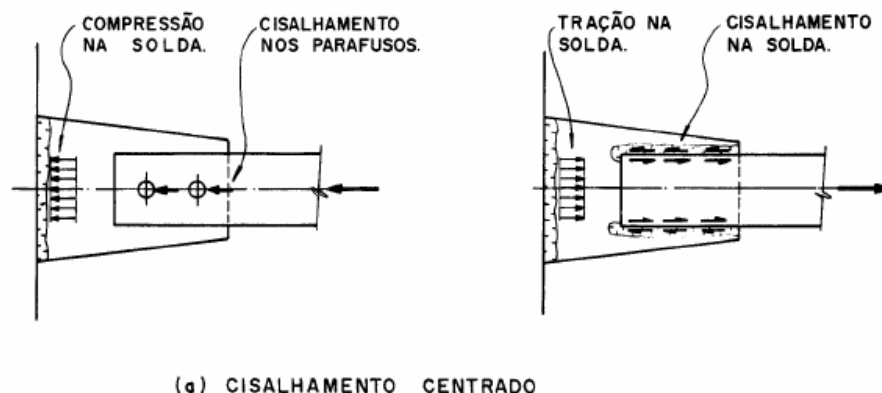


Figura 2.13: Cisalhamento Centrado. Adaptado de [18].

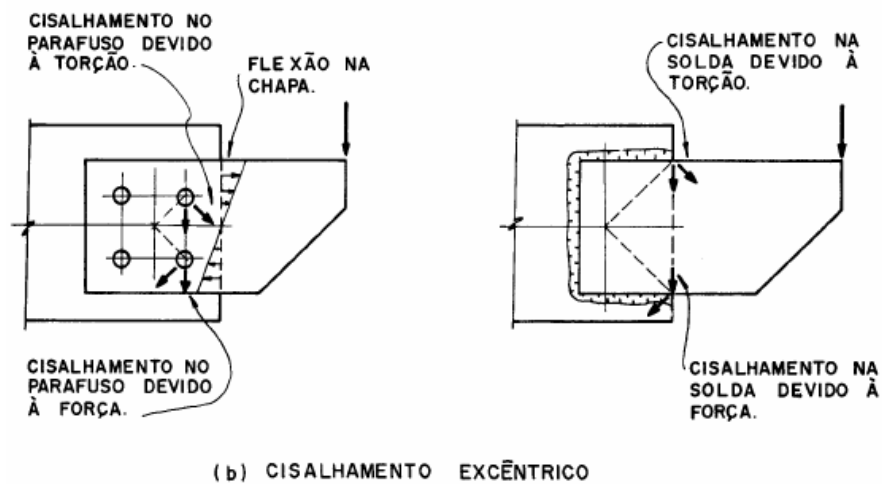


Figura 2.14: Cisalhamento Excêntrico. Adaptado de [18].

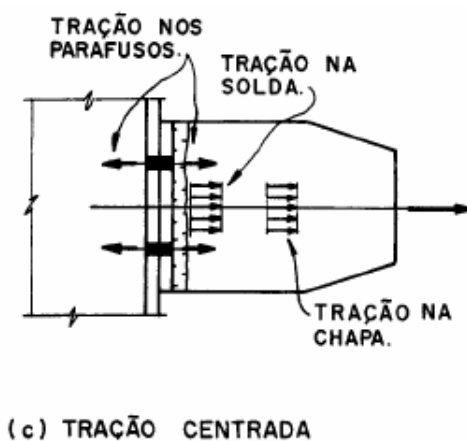


Figura 2.15: Tração Centrada. Adaptado de [18].

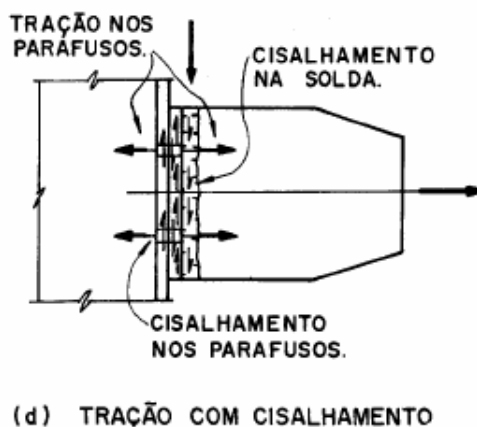


Figura 2.16: Tração com Cisalhamento. Adaptado de [18].

Segundo o local de fabricação, as ligações podem ser de fábrica e de campo. Nas ligações de fábrica, o meio de ligação normalmente utilizado é a solda. Nas ligações a serem montadas em campo, utiliza-se preferencialmente os parafusos à solda.

Finalmente, segundo a geometria, a ligação pode ser classificada conforme o arranjo das barras que formam a ligação utilizando-se letras do alfabeto para designar a disposição entre as barras. Por exemplo, ligações podem ser classificadas nos tipos “K”, “KT”, “N”, “T”, dependendo da forma como as diagonais e/ou montantes encontram-se com o banzo. As coberturas estudadas neste trabalho, ou seja, treliças de duas águas, de banzos paralelos e de arcos circulares, apresentam geralmente uma diagonal comprimida e outra tracionada soldadas no banzo, conforme a Fig. 2.17(a) e (b). Trata-se de uma ligação do tipo “K”.

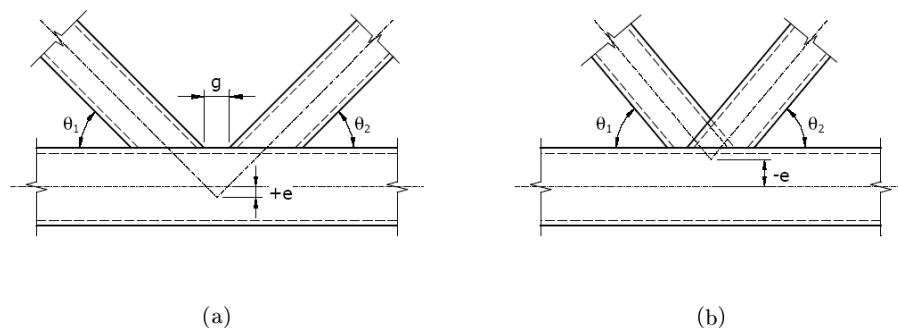


Figura 2.17: Arranjos das barras em uma ligação do tipo “K”.

As ligações soldadas do tipo “K” dividem-se em duas categorias. A primeira, em que as barras das diagonais são soldadas no banzo permitindo uma excentricidade dos eixos considerada positiva, isto é, dado pelo afastamento das barras das diagonais conforme a Fig. 2.17(a). A segunda, em que uma diagonal sobrepõe parcialmente ou completamente a outra na junção dos eixos do nó, ocasionando dessa forma uma excentricidade negativa, como observa-se na Fig. 2.17(b). Pode-se observar que ligações que possuam excentricidade zero, ou seja, aquelas onde os eixos das duas diagonais e o eixo do banzo interceptam-se em apenas um ponto, não possuem esforços de momentos fletores, já que a resultante dos esforços nas barras serão aplicadas no mesmo ponto. Dessa forma, os perfis das barras dessas ligações tendem a ser menores, e por conseqüência mais leves, já que a ligação não necessita ser dimensionada para resistir a esses esforços de momentos fletores. Por esse motivo, geralmente, projetam-se ligações do tipo “K” com excentricidade zero. No entanto, para facilitar a fabricação e a montagem, alguns projetistas preferem utilizar uma pequena excentricidade. Segundo PACKER e HENDERSON [20], se a excentricidade da ligação estiver no intervalo

proposto na inequação 2.3, os momentos fletores resultantes podem ser desprezados para o dimensionamento da ligação e para o dimensionamento dos perfis das diagonais submetidos a esforços de tração. No entanto, as diagonais comprimidas devem sempre ser dimensionadas levando em conta os efeitos da excentricidade dos nós.

$$\frac{e}{d_0} \leq 0.25 \quad (2.3)$$

De uma forma geral, ligações com gap positivo como a da Fig. 2.17(a) são mais utilizadas em projetos de treliças que as ligações com gap negativo, também conhecido como *overlap*, como na Fig. 2.17(b), devido ao fato de que ligações com *overlap* necessitam de pelo menos dois cortes por diagonal, dificultando sua fabricação. Além disso, a montagem e a soldagem dessas ligações são muito mais complicadas que as com gap positivo, tornando esse tipo de ligação menos competitivo. Dessa forma, o programa computacional desenvolvido neste trabalho utiliza apenas ligações com gap positivo, já que são as mais viáveis nas treliças abordadas neste trabalho.

2.5.3 Nomenclatura das Ligações entre Tubos

Este sub-capítulo tem como objetivo ilustrar a terminologia de uma ligação. Serão apresentados termos referentes às ligações que serão explorados freqüentemente ao decorrer deste trabalho. A Fig. 2.18 ilustra a terminologia geral de uma ligação do tipo “K”.

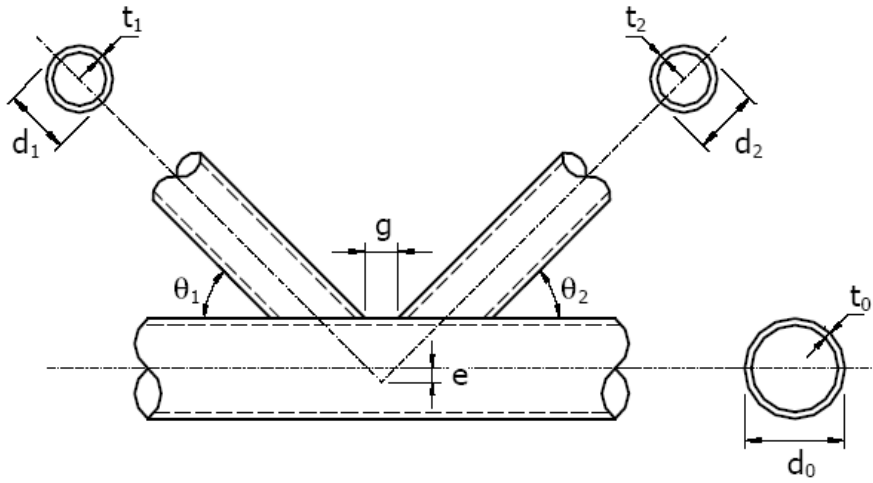


Figura 2.18: Terminologia de uma ligação tipo “K”.

Para a Fig. 2.18, tem-se os seguintes termos:

- d_0 , d_1 e d_2 : Diâmetros dos tubos das ligações, sendo que o índice θ refere-se ao banzo, e os índices 1 e 2 referem-se às diagonais;
- t_0 , t_1 e t_2 : Espessuras dos tubos das ligações, sendo que o índice θ refere-se ao banzo, e os índices 1 e 2 referem-se às diagonais;
- θ_1 e θ_2 : Ângulos formados entre as diagonais e o banzo, sendo que θ_1 refere-se à diagonal esquerda e θ_2 à diagonal direita;
- g e e : *Gap* (Sobreposição) e *Excentricidade* da ligação. O gap compreende a distância entre as barras das diagonais medidas no banzo, enquanto que a excentricidade é a distância entre o encontro dos eixos das diagonais com o eixo do banzo, medido perpendicularmente ao banzo. Pode-se perceber naturalmente que uma variável é função da outra, ou seja, dado um valor de gap, tem-se um valor de excentricidade e vice-versa. Os valores de gap e de excentricidade da ligação são extremamente importantes, já que seus valores influenciam diretamente na existência ou não de momentos fletores na ligação analisada.

A Figura 2.19 ilustra a terminologia geral de uma ligação do tipo “KT”. Neste caso, a única diferença é o acréscimo de um montante intermediário, cujo diâmetro e espessura são definidos respectivamente por d_3 e t_3 . Por causa desse montante, tem-se dois valores de gap e de excentricidade, determinados em função dos ângulos θ_1 e θ_2 e dos diâmetros das diagonais d_1 e d_2 . No caso da Fig. 2.19, os valores de g_1 e g_2 são os mesmos, assim como e_1 e e_2 .

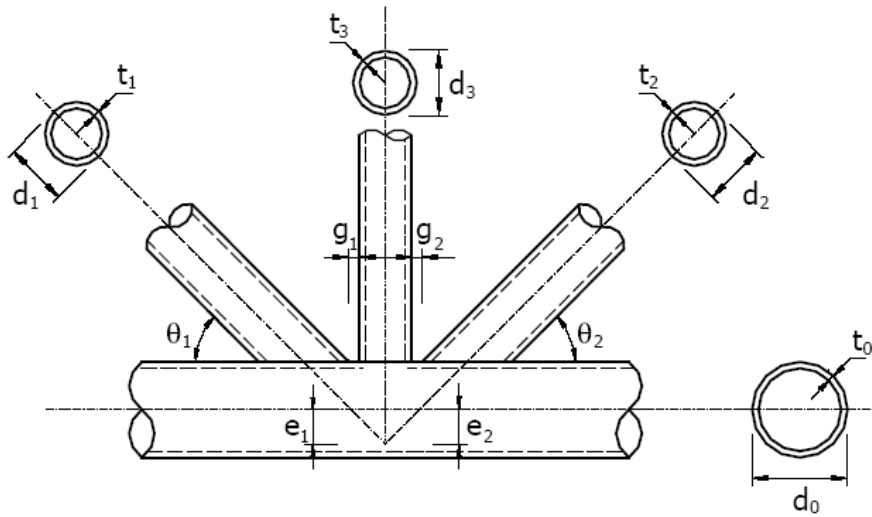


Figura 2.19: Terminologia de uma ligação tipo “KT”.

Capítulo 3

Desenvolvimento das Rotinas de Geração da Estrutura

3.1 Considerações Gerais

Este capítulo tem o objetivo de realizar a explicação dos algoritmos básicos que foram desenvolvidos com o objetivo de automatizar o projeto estrutural das coberturas em estudo, usando-se dos fundamentos teóricos apresentados no capítulo anterior. Será abordado neste capítulo como se faz o lançamento da estrutura dentro do software AutoCAD, nas versões R-14 ou superior, e como o projeto gerado automaticamente é exportado para o ambiente CAE para a análise estrutural e futuro dimensionamento.

3.2 Inserindo as Rotinas no AutoCAD

Como já foi apresentado anteriormente, o sistema CAD/CAE que está em desenvolvimento neste projeto inicia-se dentro do software AutoCAD. Para que as rotinas sejam carregadas automaticamente, faz-se necessária a instalação do programa, através da execução do arquivo *ADesign.exe*. Esse arquivo irá descompactar os arquivos necessários no computador, dentre eles, o arquivo denominado *acad.lsp*. Toda vez que o AutoCAD se ini-

cia, automaticamente ele busca no seu diretório raiz o arquivo *acad.lsp*. Se encontrá-lo, o AutoCAD vai carregá-lo e seguir as orientações que estão detalhadas neste arquivo. Caso ele não encontre o *acad.lsp*, o programa se inicia normalmente. Neste trabalho, foi desenvolvido um arquivo *acad.lsp* que automaticamente realiza o carregamento das rotinas de geração das coberturas. Dessa forma, não será necessário ao usuário carregar as rotinas toda vez que iniciar o AutoCAD; ao invés disso, o próprio CAD se encarrega desta operação. A Fig. 3.1 mostra a tela do AutoCAD logo após ocorrer o carregamento deste arquivo.

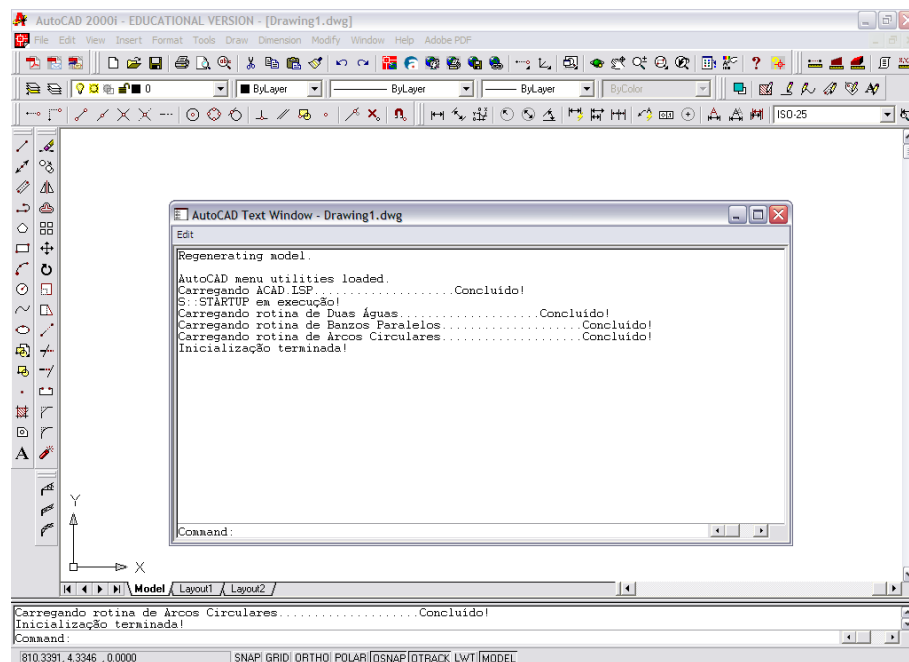



Figura 3.1: Tela inicial do AutoCAD, exibindo que as rotinas foram carregadas.

O usuário que já possui um arquivo *acad.lsp* com instruções no seu computador deve reprogramá-lo e adicionar no arquivo as instruções que irão carregar as rotinas desenvolvidas neste projeto.

Com as rotinas devidamente carregadas, o último passo antes de se executar as rotinas é indicar ao AutoCAD o local onde os arquivos de suporte estão localizados. Para isso, é necessário clicar no menu *Tools* (Ferramentas) e clicar em *Options* (Opções). Finalmente, na aba *Files* (Arquivos), é possível indicar em qual pasta os arquivos de suporte estão localizados, no caso, arquivos de extensão *dcl*. Uma vez feito esse procedimento, não será mais necessário repeti-lo, a não ser que o local onde se encontram os arquivos de suporte seja alterado. Apenas na versão R-14 é necessário reiniciar o AutoCAD para que as alterações tenham efeito.

3.3 Rotina de Treliças de Duas Águas

3.3.1 Geração da Geometria da Treliça

A rotina de treliças de duas águas, que corresponde ao arquivo *tda.lsp*, é a responsável por realizar o projeto de um galpão de cobertura formada por treliças de duas águas. A rotina avalia os dados de entrada do usuário e, com eles, realiza o projeto estrutural automaticamente. Todo o processo é otimizado e automático. Além disso, as rotinas utilizam caixas de diálogo que explicam claramente os dados necessários para que o projeto seja realizado com sucesso. Para iniciar o programa, é necessário ao usuário clicar no ícone referente à rotina de treliças de duas águas, , ou digitar na tela de textos do AutoCAD o comando *TDA* (*T*reliça de *D*uas *A*guas). Com isso, o AutoCAD abrirá automaticamente uma caixa de diálogos como a da Fig. 3.2 abaixo, pedindo ao usuário os seguintes dados de entrada:

- Vão livre da estrutura, em metros;
- Ângulo de arranque da estrutura, em graus;
- Inclinação do banzo superior, em graus;
- Inclinação do banzo inferior, em graus;
- Altura projetada do primeiro montante, em metros;
- Máxima distância entre terças, em metros;
- Altura dos pilares, em metros.

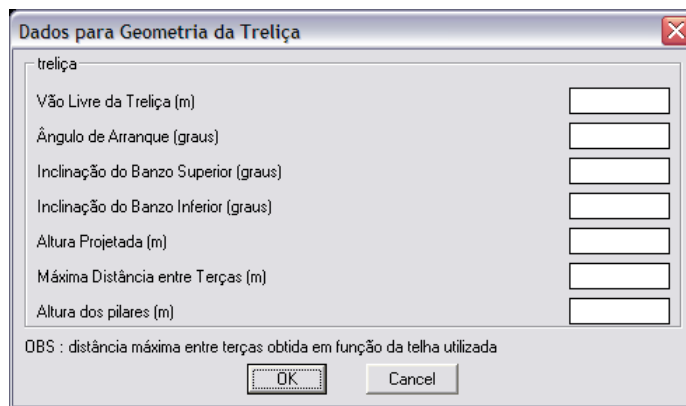


Figura 3.2: Caixa de Diálogo do AutoCAD, para a introdução dos dados de entrada do programa.

Os dados de entrada são armazenados em variáveis internas dentro do programa, conforme a Tab. 3.1.

Tabela 3.1: Lista de variáveis para os dados de entrada, na rotina de treliças de duas águas.

| Dado de Entrada | Variável |
|-------------------------------|-----------|
| Vão Livre | VAO |
| Ângulo de Arranque | ANGULO |
| Inclinação do Banzo Superior | I1 |
| Inclinação do Banzo Inferior | I2 |
| Altura Projetada | HP |
| Máxima Distância entre Terças | ESPACOMAX |
| Altura dos Pilares | ALTURA |

A Figura 3.3 abaixo mostra o que cada um dos dados de entrada representa no desenho da treliça de duas águas.

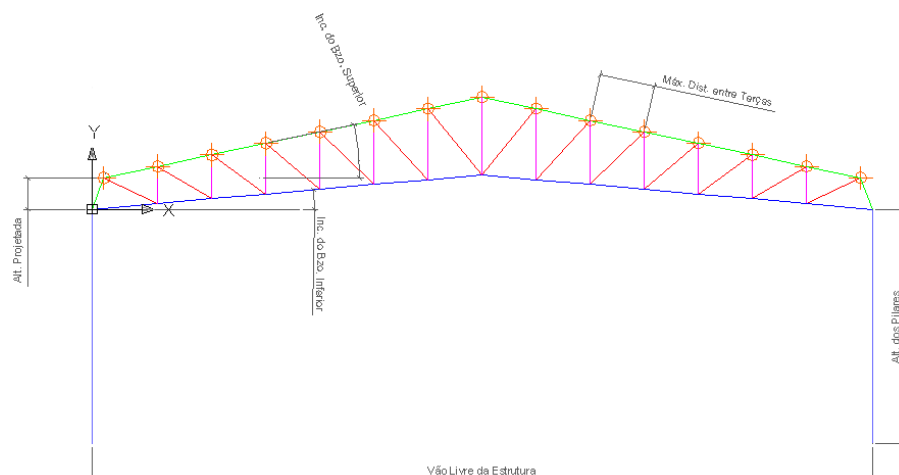


Figura 3.3: Dados de entrada da rotina de Treliças de Duas Águas.

Com esses dados de entrada, o programa irá automaticamente realizar o desenho da treliça de duas águas, indicando o posicionamento das terças na treliça, e será capaz de exportar esses dados para um programa CAE, o *AutoMETAL*, por um arquivo de extensão *dxf*.

3.3.2 Análise dos Dados de Entrada e Execução do Projeto da Treliça

Quando o usuário clica em *OK* na caixa de diálogo da Fig. 3.2, a rotina avalia a validade dos dados de entrada. De início, se a máxima distância entre terças for zero ou um valor negativo, o programa é encerrado com um alerta ao usuário, explicando que esse valor deve ser positivo e diferente de zero. Outras avaliações da validade dos dados de entrada serão feitas mais adiante no programa, conforme será apresentado ainda neste capítulo.

A seguir, o programa apaga tudo o que está na tela, antes de realizar o projeto da treliça. Isso faz com que caso o usuário queira alterar os dados de entrada ou iniciar um novo projeto, será possível repetir o processo automaticamente sem que haja sobreposição. Em seguida, o programa irá criar os *layers* necessários ao desenho da treliça: *BzoSup* (*layer* referente ao Banzo Superior), *BzoInf* (*layer* referente ao Banzo Inferior), *Diagonais*, *Mont* (*layer* referente aos Montantes), *Pilares*, *Terças* e finalmente, *Texto*.

Em seguida, a rotina irá armazenar na memória as coordenadas cartesianas de dois pontos importantes no desenho da treliça. Esses pontos têm os seguintes nomes e coordenadas:

- ORIGEM, de coordenada (0,0);
- VAO, de coordenada (VAO, 0);

Com essas variáveis armazenadas, somadas com os dados de entrada, é possível que o programa calcule os seguintes comprimentos, armazenando-os em variáveis internas do programa:

$$HIP = \frac{HP}{\sin ANGULO} \quad (3.1)$$

$$CA = \cos ANGULO \cdot HIP \quad (3.2)$$

$$CO = \frac{\sin I2}{\cos I2} \cdot \frac{VAO}{2} \quad (3.3)$$

$$CO2 = \frac{\sin I1}{\cos I1} \cdot (CO2 + HP) \quad (3.4)$$

Com esses comprimentos e com os dados de entrada, o programa já é capaz de encontrar as coordenadas cartesianas de pontos importantes no desenho da treliça. São eles:

- PONTO 2, de coordenadas (CA, HP);
- PONTO 3, de coordenadas ($\frac{VAO}{2}$, CO);
- PONTO 4, de coordenadas ($\frac{VAO}{2}$, CO2 + HP).

A Figura 3.4 abaixo ilustra o posicionamento desses pontos no desenho de uma treliça genérica.

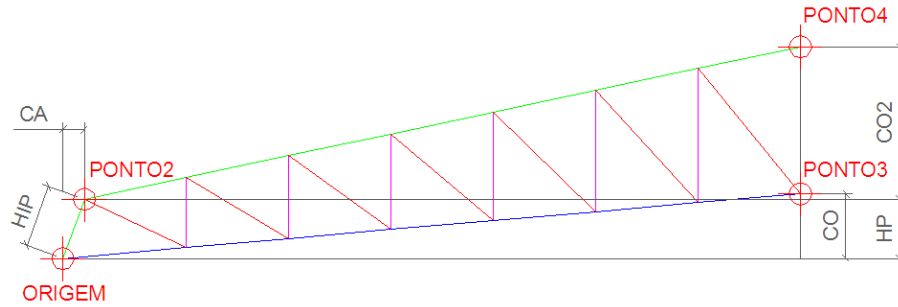


Figura 3.4: Localização de pontos importantes no desenho da treliça.

Com a definição dos pontos de extremidade da treliça, levando-se em conta seu eixo de simetria, o programa passa a ter condições suficientes para saber onde estarão posicionados os montantes, diagonais e terças na treliça, em função da máxima distância entre terças fornecida pelo usuário.

O procedimento que o programa executa é dividir a distância entre os PONTOS 2 e 4 da Fig. 3.4 pela máxima distância entre terças. Dessa forma, o programa calcula o número de barras pertencentes ao banzo superior e a distância entre terças, que respeitará o valor máximo fornecido pelo usuário.

A partir desse ponto, o programa faz uma avaliação das coordenadas onde as terças estão localizadas. A primeira tentativa do programa é posicionar a extremidade dos montantes e diagonais da treliça nessas coordenadas, como na Fig. 3.5. Para isso, o programa verifica o ângulo formado pelas barras do banzo inferior com as diagonais: caso esses ângulos estejam entre 20° e 60° graus, ele finaliza o desenho da treliça. A escolha do ângulo mínimo fixado em 20° ao invés dos 30° discutido no item 2.2.1.1 é justificada para que o programa não trave a todo momento, já que na maioria das geometrias convencionais, o menor ângulo encontrado é inferior a 30° . A Fig. 3.5 mostra os ângulos formados por uma treliça de 20,0 metros de vão livre, 90° de ângulo de arranque, 10° de inclinação do banzo superior, 0,8 metro de altura projetada, 2,0 metros de distância máxima entre terças e 5,0 metros de altura dos pilares. Como o programa verificou que os ângulos formados pelas barras do banzo inferior com as diagonais respeitam o intervalo proposto, o programa dá continuidade, executando o espelho da treliça:

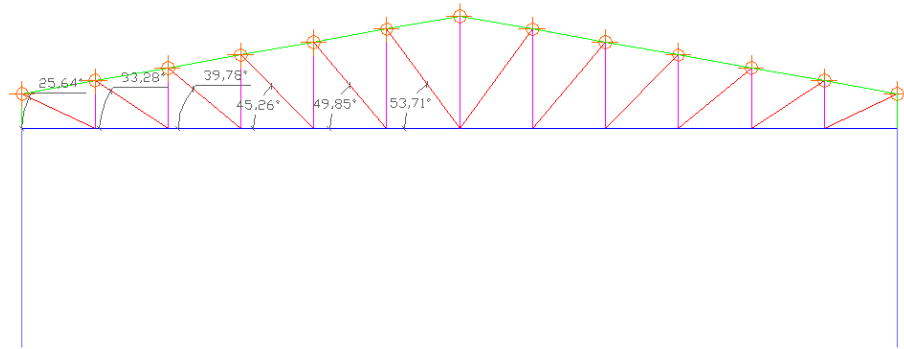


Figura 3.5: Os ângulos deste exemplo estão no intervalo proposto em 2.2.1.1.

Entretanto, dependendo dos dados de entrada, o intervalo dos ângulos pode ficar fora do proposto (entre 20° e 60°). Caso algum ângulo seja superior à 60° , o programa automaticamente sugere um novo arranjo de barras, com o objetivo de distribuir de uma maneira mais uniforme as cargas de tração e compressão que passam pela estrutura. A Fig. 3.6 mostra esse novo arranjo, para uma treliça idêntica à anterior, mas com inclinação de 15° de banzo superior. Nesse novo arranjo, o programa dá continuidade, espelhando a estrutura.

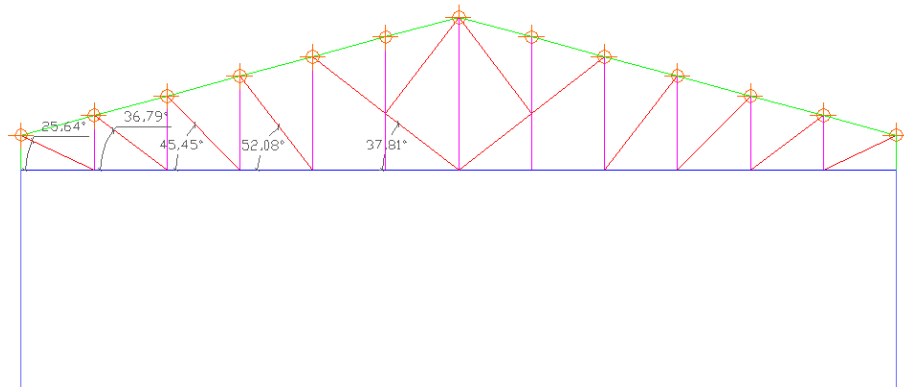


Figura 3.6: O novo arranjo das barras permite diminuir o ângulo da última diagonal, resultando numa melhor distribuição das ações na treliça.

No outro extremo, caso algum ângulo seja menor que 20° , o programa divide a estrutura, colocando montantes intermediários entre as terças. A Fig. 3.7 ilustra esse caso, com uma treliça de 20,0 metros de vão livre, ângulo de arranque de 90° , inclinação dos banzos superior e inferior de 5° e 0° respectivamente, 0,6 metro de altura projetada, 2,0 metros de máxima distância entre terças e altura dos pilares de 5,0 metros. Para esse arranjo, o

menor e maior ângulo (respectivamente o da primeira e última diagonal) são $35,75^\circ$ e $59,27^\circ$, respeitando o intervalo proposto.

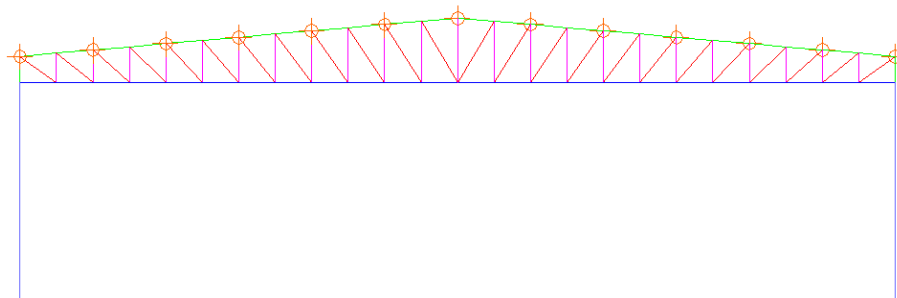


Figura 3.7: Arranjo realizado automaticamente, caso algum ângulo seja menor que 20° .

Neste mesmo arranjo, existe a possibilidade dos ângulos mais próximos ao eixo de simetria da treliça tornarem-se superiores a 60° . Caso isso ocorra, o programa exibe um alerta ao usuário, explicando que o novo arranjo é inviável para esses dados de entrada. É recomendado aumentar a altura projetada, e a seguir, o programa é reiniciado.

Logo que a treliça é apresentada ao usuário, seguindo o algoritmo apresentado anteriormente, alguns dados importantes são apresentados ao usuário, que dessa forma poderá avaliar se a treliça corresponde às suas necessidades. Esses dados são calculados automaticamente no programa e exibidos na tela do AutoCAD. A Fig. 3.8 abaixo foi retirada de uma tela do AutoCAD e ilustra um exemplo para os seguintes dados de entrada: 20,0 metros de vão livre, 90° de ângulo de arranque, 10° de inclinação do banzo superior, 0,8 metro de altura projetada, 2,0 metros de distância máxima entre terças e 5,0 metros de altura dos pilares.

```
GEOMETRIA DA TRELIÇA PROPOSTA:
Altura Projetada: 0.8 m
Altura da Treliza no Meio do Vao: 2.5633 m
Menor Angulo entre Banzos e Diagonais: 25.64 graus
Maior Angulo entre Banzos e Diagonais: 53.71 graus
Inclinacao do Banzo Superior: 10 graus
Inclinacao do Banzo Superior: 0 graus
Comprimento da Maior Barra do Banzo Superior: 1.6924 m
Comprimento da Maior Barra do Banzo Inferior: 1.6667 m
Distancia entre Terças: 1.6924 m
```

Figura 3.8: Texto retirado da tela do AutoCAD, com dados calculados automaticamente.

Assim, o usuário tem a opção de aceitar ou não a treliça resultante. Caso o usuário não aceite, o processo é reiniciado, pedindo-se novamente os dados de entrada ao usuário. Nessa segunda tentativa, a caixa de diálogo inicial vai aparecer preenchida com os últimos dados de entrada. Dessa maneira, ele tem a possibilidade de rever o que foi digitado, facilitando a alteração dos dados.

3.3.3 Geração da Planta de Contraventamentos da Estrutura

Caso o usuário aceite a treliça proposta, surgirá na tela do AutoCAD uma nova caixa de diálogos, que pedirá ao usuário novos dados de entrada, agora referentes ao galpão:

- Comprimento da Estrutura, em metros;
- Distância entre pilares, em metros;

Além disso, a caixa de diálogos pergunta ao usuário se a fachada frontal e o fechamento de fundos serão feitos em alvenaria ou em estrutura metálica. Esses dois dados são importantes para determinar se haverá ou não contraventamentos laterais nas duas fachadas do galpão. A Fig. 3.9 ilustra a caixa de diálogos que pede os dados referentes ao edifício.

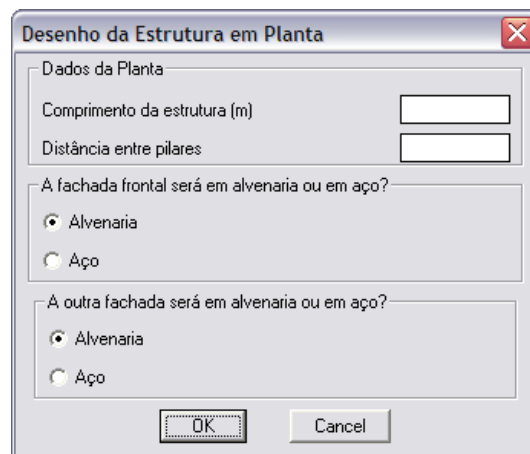


Figura 3.9: Caixa de Diálogo do AutoCAD, pedindo dados referentes ao galpão.

Assim que o usuário confirma os dados referentes à planta de contraventamentos da estrutura, o programa realiza verificações para validar os dados de entrada. Como a estrutura

final será modulada, o comprimento da estrutura deve ser um valor múltiplo da distância entre os pilares, por exemplo, uma edificação com 50,0 metros de comprimento, com distância entre treliças a cada 5 metros. Caso os dados de entrada não sejam consistentes, o programa alerta o usuário e volta para a caixa de diálogos. Se os dados forem validados, o programa dá continuidade e realiza o desenho da planta de contraventamentos da estrutura.

O primeiro passo do programa é rotacionar a treliça proposta em 90° . A treliça rotacionada será movida para a esquerda em uma distância proporcional à altura dos pilares. Dessa forma, o programa usará novamente como referência o ponto ORIGEM (0,0), sem que haja sobreposição dos desenhos.

A seguir, o programa cria e modifica os *layers* necessários ao desenho da planta de contraventamentos, que são: *Contrav* (*layer* referente aos Contraventamentos), *Treliça* (*layer* referente ao desenho das treliças na planta), *Alvenaria* (*layer* referente à Alvenaria), *LC* (*layer* referente às Linhas de Corrente, tracejadas), *LCC* (*layer* referente às Linhas de Corrente, contínuas), *Cortes* (*layer* referente às indicações dos Cortes) e, finalmente, *Textov* (*layer* referente à textos, na cor vermelha).

Em seguida, o programa realiza o desenho das treliças na planta de contraventamentos da estrutura. A representação das treliças é feita por uma única linha que percorre todo o vão livre da estrutura. Caso o usuário tenha optado por usar fechamentos em alvenaria, no lugar de uma linha de *layer* Treliça, o programa desenha uma linha no *layer* Alvenaria, indicando a presença de uma fachada de alvenaria no local. A Fig. 3.10 ilustra uma estrutura com os dois fechamentos em alvenaria, de 45 metros de comprimento, com treliças de 5 em 5 metros. Pode-se ver que o programa já rotacionou a treliça desejada e também as 8 treliças dispostas na estrutura de fechamento de alvenaria.

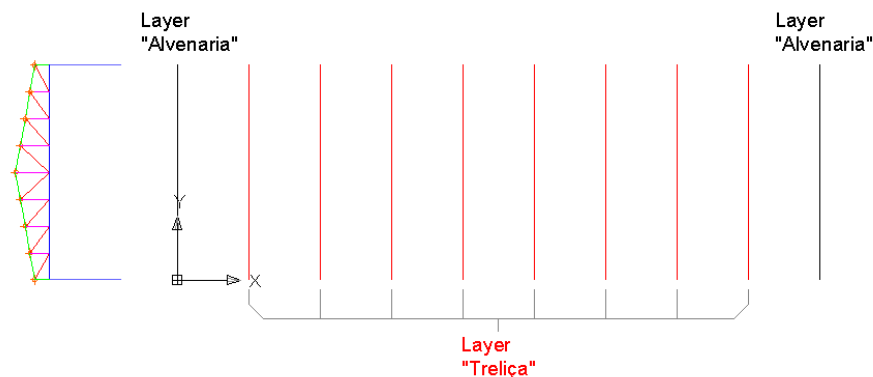


Figura 3.10: Representação das treliças na planta de contraventamentos da estrutura.

Em seguida, o programa realiza o desenho das terças na planta de contraventamentos. O procedimento é simplificado pelo fato do programa já ter em sua memória, alocado na variável *DISTT*, o valor da distância entre terças. A representação das terças é feita em um *layer* específico, chamado Terças.

No eixo de simetria da treliça haverá duas terças distantes de 30 centímetros, localizadas sob a cumeeira. Essa distância é fixa e foi determinada para que houvesse espaço suficiente para a fixação das barras através de parafusos. O programa trabalha com um comando de repetição até a terça central, onde ele realiza o desenho das duas terças centrais. A partir desse ponto, ele realiza o mesmo processo de repetição, desenhando todas as terças na planta de contraventamentos da estrutura. A Fig. 3.11 ilustra a representação das terças no projeto da planta de cobertura.

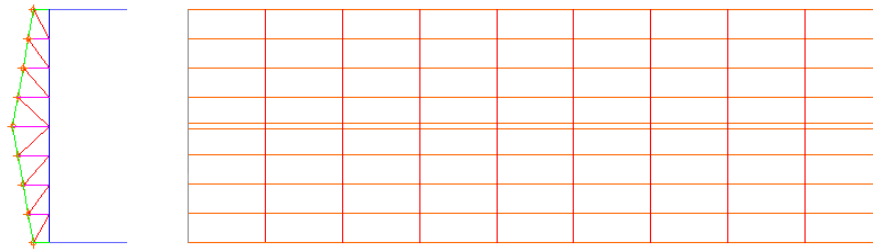


Figura 3.11: Representação das terças na planta de contraventamentos da estrutura.

Em seguida, o programa realiza os contraventamentos do banzo superior na estrutura. Primeiramente, o programa verifica o valor das variáveis *ACO1* e *ACO2*. Essas variáveis são as responsáveis por guardar os dados do usuário, entrados na caixa de diálogos da Fig. 3.9, que informam se os fechamentos frontal e dos fundos serão feitos em alvenaria ou em estrutura metálica. Caso o fechamento frontal seja feito em estrutura metálica, o programa aloca o valor “1” na variável *ACO1*. Caso contrário, o programa aloca o valor “0” na mesma variável. O mesmo é feito para o fechamento dos fundos, na variável *ACO2*. Dessa forma, o programa sabe em que lugar executar a primeira e a última fileira de contraventamentos: se o fechamento for em estrutura metálica, ele realiza o contraventamento no primeiro (ou último, tratando-se do fechamento dos fundos) módulo da estrutura. Caso o fechamento seja em alvenaria, o programa salta um módulo e realiza o contraventamento.

Existem duas sub-rotinas no programa para o desenho das fileiras de contraventamentos. A primeira delas é usada quando existe um número par de barras do banzo superior, e a segunda, para um número ímpar. Essa diferença se faz necessária por que o contraven-

tamento é feito a cada duas barras em “X”. Quando o número de barras do banzo superior é ímpar, o programa realiza o primeiro contraventamento em apenas uma terça para depois fazer de duas a duas. Isso faz com que não ocorra contraventamentos fora do plano da treliça.

Para realizar o contraventamento, o programa usa o recurso das coordenadas polares, usando o ponto ORIGEM (0,0) como referência. O uso desse recurso é justificado pela facilidade que o AutoLISP possui para determinar as coordenadas de um ponto a partir de uma referência. Caso o fechamento for em alvenaria, o programa salta um módulo, ou seja, ao invés de partir da ORIGEM, ele parte do próximo ponto na extremidade do galpão de onde parte uma treliça, isto é, do ponto de coordenada $(x,0)$, onde x é a distância entre treliças fornecida pelo usuário na caixa de diálogos da Fig. 3.9. A partir da referência, a sub-rotina irá realizar o contraventamento da estrutura de duas em duas barras, do início ao fim da estrutura, compreendendo todo o vão livre. Como a representação gráfica do contraventamento no desenho da estrutura é simplesmente uma linha, as variáveis que interferem na sua execução são a distância entre terças e a distância entre treliças. A sub-rotina usa a função *repeat*, que faz com que uma seqüência de comandos seja repetida quantas vezes forem necessárias. No caso, o número de repetições é a divisão do número de barras do banzo superior por dois. A sub-rotina realiza o primeiro contraventamento, e depois, modifica as coordenadas dos pontos que serão contraventados em função da distância entre terças, percorrendo todo o vão livre da estrutura. Em seguida, o programa realiza o contraventamento da outra fachada da mesma maneira.

O programa também toma o cuidado de realizar o contraventamento corretamente no eixo de simetria da estrutura, que possui duas terças. A Fig. 3.12 ilustra os dois primeiros contraventamentos que a estrutura realiza na estrutura com os dois fechamentos em alvenaria, de 45 metros de comprimento, com treliças de 5 em 5 metros.

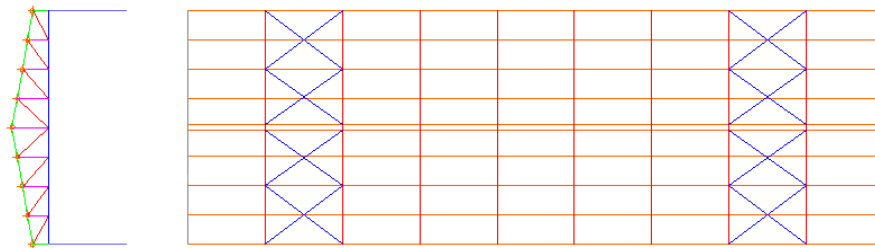


Figura 3.12: Contraventamento das duas fachadas da estrutura realizado automaticamente.

Após realizar o contraventamento das fachadas, o programa verifica a necessidade da existência ou não de contraventamentos internos na estrutura. Foi implementado ao programa uma sub-rotina, cujo algoritmo será apresentado a seguir, que além de verificar a necessidade ou não dos contraventamentos intermediários, mostrará, em caso positivo, a localização desses contraventamentos na estrutura.

Primeiramente, o algoritmo calcula quantos módulos existem entre os dois contraventamentos das fachadas. O resultado depende do comprimento da estrutura, da distância entre treliças e da forma desejada dos fechamentos (em alvenaria ou em estrutura metálica). Esse valor é alocado em uma variável chamada CBS1. Se o valor de CBS1 for menor ou igual a quatro, significa que a estrutura tem apenas quatro ou menos módulos internos, e portanto, não há a necessidade de se realizar o contraventamento. Foi fixado o valor de quatro módulos livres em seqüência sem contraventamentos na estrutura devido ao comportamento da estrutura metálica tubular.

Se o valor de CBS1 for maior que quatro, significa que a estrutura necessita de contraventamentos internos, os quais impedirão os deslocamentos das barras e diminuirão seus comprimentos de flambagem significativamente. Para determinar a quantidade de contraventamentos internos que haverão na estrutura, a sub-rotina fixa duas variáveis, com o objetivo de determinar o valor desejado por meio de tentativas. Primeiramente, o programa aloca na variável NCI (Número de Contraventamentos Internos) o valor “1”, e na variável NEI (Número de Espaçamentos Internos) o valor “2”. Isto é, a primeira hipótese do programa é que apenas um contraventamento seja suficiente, dividindo a estrutura em duas metades. A verificação é feita através da Equação 3.5:

$$CBS2 = \frac{CBS1 - NCI}{NEI} \quad (3.5)$$

Se o valor calculado na Equação 3.5 for inferior ou igual a quatro, significa dizer que a hipótese do programa é correta, ou seja, uma fileira de contraventamentos internos são suficientes para manter a estabilidade global da estrutura. Caso contrário, o programa utiliza o comando *while*, que é capaz de repetir um conjunto de operações enquanto uma condição for verdadeira. No caso, a segunda tentativa do programa é posicionar duas fileiras de contraventamentos da estrutura (ou seja, a variável NCI passa a ser “2”), com três espaços internos (ou seja, a variável NEI passa a ser “3”), e a verificação é feita novamente pela Equação 3.5. Enquanto o valor encontrado em CBS2 for maior que quatro, o programa soma

em “1” nas variáveis NCI e NEI, até determinar o quantos contraventamentos intermediários serão necessários (dado pelo valor final encontrado na variável NCI), para que não haja mais do que quatro módulos não contraventados continuamente na estrutura.

Para determinar a posição dos contraventamentos internos na estrutura, o programa avalia a variável CBS2. Se a variável CBS2 for três ou quatro, significa dizer que os contraventamentos internos estarão posicionados a cada três ou quatro módulos na estrutura, e nesse caso, a edificação será simétrica. A representação gráfica dos contraventamentos internos é feita da mesma maneira que os contraventamentos das fachadas, ou seja, em “X” e de duas em duas terças. A Fig. 3.13 ilustra esse caso: o comprimento da estrutura é de 64 metros e a distância entre pilares é de 4 metros. As duas fachadas da edificação são feitas em estrutura metálica. Nesse caso, as variáveis calculadas estão presentes na Tab. 3.2.

Tabela 3.2: Valores das variáveis para o exemplo da Fig. 3.13.

| Variável | Fórmula | Valor Encontrado |
|----------|---|------------------|
| CBS1 | $\frac{\text{comprimento}}{\text{dist. entre pilares}} - 2$ | 14 |
| NCI | 2º tentativa | 2 |
| NEI | 2º tentativa | 3 |
| CBS2 | $\frac{CBS1 - NCI}{NEI}$ | 4 |

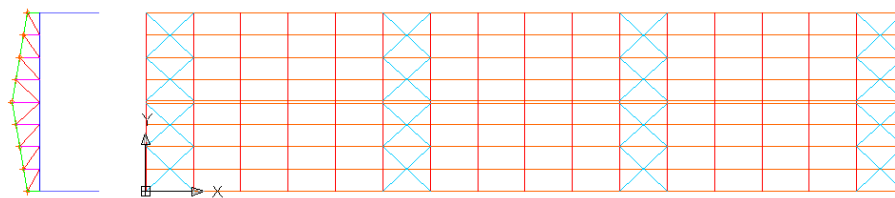


Figura 3.13: Representação dos contraventamentos internos.

Caso o valor da variável CBS2 não seja um número natural, o programa divide a variável em duas: a primeira, que se chamará CBS2E, com a parte da variável antes da vírgula e a segunda, que se chamará CBS2D, com a primeira casa decimal da variável. Para ilustrar, caso o valor alocado na variável CBS2 seja “3,5”, o programa criará duas variáveis: a primeira, CBS2E, com o valor “3,0” e a segunda, CBS2D, com o valor “5,0”.

Em seguida, o programa analisa o valor alocado na segunda variável, CBS2D. Se esse valor for maior ou igual a cinco, o programa irá posicionar todos os contraventamentos, dados pela variável NCI, a partir da primeira fachada, separados um do outro através de $(CBS2E + 1)$ módulos. O último contraventamento interno será distante de CBS2E do contraventamento da outra fachada. A Fig. 3.14 ilustra esse caso, com o auxílio da Tab. 3.4, para uma estrutura de 65 metros de comprimento, com distância entre pilares a cada 5,0 metros, com uma fachada em alvenaria e a outra em estrutura metálica. Pode-se perceber que entre as duas primeiras fileiras de contraventamentos existem três módulos livres (dados por $CBS2E + 1$), e entre o penúltimo e o último módulo de contraventamentos existem dois módulos livres (dados por CBS2E).

Tabela 3.4: Valores das variáveis para o exemplo da Fig. 3.14.

| Variável | Fórmula | Valor Encontrado |
|----------|---|------------------|
| CBS1 | $\frac{\text{comprimento}}{\text{dist. entre pilares}} - 3$ | 10 |
| NCI | 2º tentativa | 2 |
| NEI | 2º tentativa | 3 |
| CBS2 | $\frac{CBS1 - NCI}{NEI}$ | 2,667 |
| CBS2E | Parte inteira de CBS2 | 2 |
| CBS2E | Parte real de CBS2 | 0,667 |

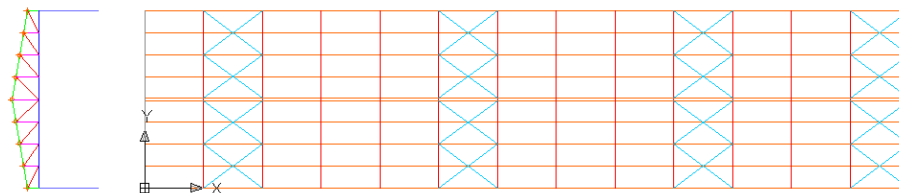


Figura 3.14: Representação dos contraventamentos internos para CBS2D maior que 5.

Se o valor encontrado na variável CBS2D for menor que cinco, o programa irá posicionar todos os contraventamentos, dados pela variável NCI, a partir da primeira fachada, separados um do outro através de CBS2E módulos. O último contraventamento interno será distante de $(CBS2E+1)$ do contraventamento da última fachada. A Fig. 3.15 ilustra esse caso, com o auxílio da Tab. 3.5, para uma estrutura de 75 metros de comprimento, com

distância entre pilares a cada 5,0 metros, com uma fachada em alvenaria e a outra em estrutura metálica. Pode-se perceber que entre as duas primeiras fileiras de contraventamentos existem três módulos livres (dados por $CBS2E$), e entre o penúltimo e o último módulo de contraventamentos existem quatro módulos livres (dados por $CBS2E + 1$).

Tabela 3.5: Valores das variáveis para o exemplo da Fig. 3.15.

| Variável | Fórmula | Valor Encontrado |
|----------|---|------------------|
| CBS1 | $\frac{\text{comprimento}}{\text{dist. entre pilares}} - 3$ | 12 |
| NCI | 2º tentativa | 2 |
| NEI | 2º tentativa | 3 |
| CBS2 | $\frac{CBS1 - NCI}{NEI}$ | 3,333 |
| CBS2E | Parte inteira de CBS2 | 3 |
| CBS2E | Parte real de CBS2 | 0,333 |

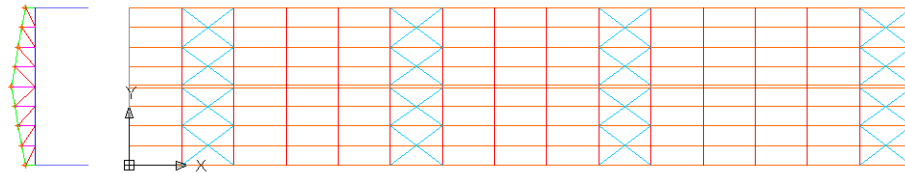


Figura 3.15: Representação dos contraventamentos internos para $CBS2D$ menor que 5.

Desse modo, todos os algoritmos apresentados compreendem todas as possibilidades de edificações. A partir desse ponto, o programa irá para a próxima etapa, que é a representação dos cortes da estrutura.

3.3.4 Geração das Linhas de Corrente

A geração das linhas de corrente está contida em apenas duas rotinas dentro do programa, denominadas *lcorrente1* e *lcorrente2*. A diferença básica entre elas é que a primeira rotina realiza apenas uma linha de corrente em cada módulo da estrutura, ou seja, uma linha de corrente entre duas treliças, enquanto que a segunda rotina realiza duas linhas de corrente.

Em estruturas onde a distância entre treliças é menor ou igual a cinco metros, o programa realiza a primeira rotina; em casos onde a distância entre treliças é superior a cinco metros, o programa utiliza a segunda rotina. Essa escolha é feita de forma simples através do comando *if*, o comando condicional da linguagem AutoLISP.

As rotinas de linhas de corrente foram desenvolvidas basicamente usando o comando *repeat* do AutoLISP: primeiro, a rotina repete o desenho das linhas de corrente em cada módulo da edificação, na direção da treliça, percorrendo o vão livre da estrutura. Em seguida, a rotina repete o desenho do primeiro módulo para os módulos seguintes, na direção do comprimento da estrutura.

A rotina também é a responsável por modificar as propriedades do *layer* LC (*layer* referente às Linhas de Corrente, tracejada), criados em 3.3.3. A rotina carrega o arquivo do AutoCAD chamado *ACAD_ISO03W100.lin* e modifica as propriedades da *layer*, que deixa de ser contínua para ser tracejada.

Para estruturas onde a distância entre treliças é menor ou igual a cinco metros, a rotina *lcorrente1* realiza a representação de uma linha de corrente em cada módulo da estrutura. O programa realiza a primeira série de repetições, ou seja, aquela que realiza o primeiro conjunto de linhas de corrente no primeiro módulo da edificação. As representações gráficas das linhas de corrente não estão posicionadas exatamente nos pontos médios da distância entre as treliças: elas se posicionam a seis centímetros do eixo de simetria do módulo, alternado-se de terça em terça, ou seja, cada linha de corrente se distancia de doze centímetros uma da outra, na direção do seu eixo. Essa distância existe para a fixação das linhas de corrente na terça, sem que haja sobreposição entre elas. Após passar pela terça, cada linha de corrente ultrapassa seis centímetros da terça, para que haja espaço necessário para a fixação dos parafusos. A Fig. 3.16 ilustra um detalhe da representação gráfica das linhas de corrente, mostrando a distância entre as linhas de corrente.

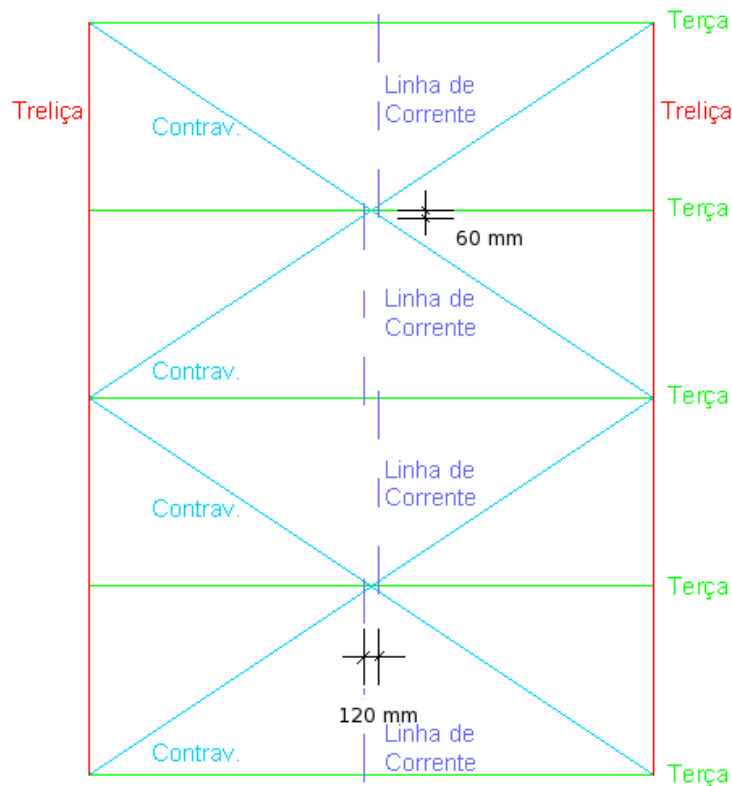


Figura 3.16: Detalhe das linhas de corrente, para distância entre treliças inferiores ou iguais a 5 metros.

Para estruturas onde a distância entre treliças é superior a cinco metros, a rotina *lcorrente2* se encarrega de realizar duas linhas de corrente em cada módulo. Da mesma forma que a outra rotina, as linhas de corrente estão espaçadas de 120 milímetros umas das outras. A diferença nesse caso é que as linhas de corrente estão alternadas em dois modos: no primeiro, as duas linhas de corrente se posicionam a seis centímetros do eixo, ambas para o lado do eixo de simetria do módulo; no segundo, as duas linhas de corrente se posicionam para fora do eixo do módulo. A Fig. 3.17 ilustra a representação gráfica das linhas de corrente, mostrando as distâncias entre elas.

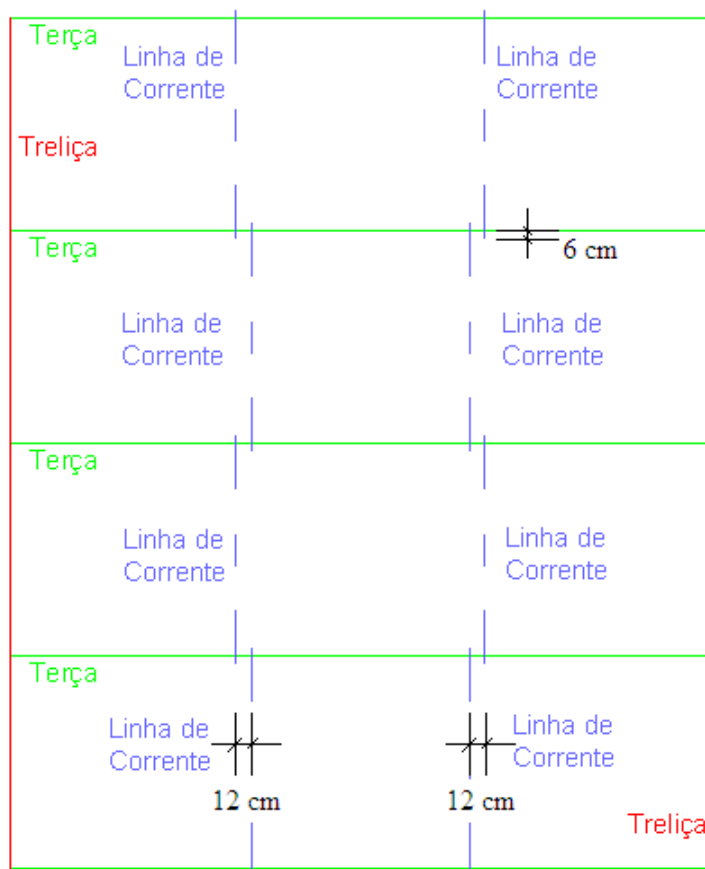


Figura 3.17: Detalhe das linhas de corrente, para distância entre treliças maiores que 5 metros.

No eixo de simetria da estrutura, a rotina que executa as linhas de corrente posiciona também uma barra de fixação, de comprimento 420 milímetros. Esse comprimento se deve ao fato da distância entre as terças centrais ser de 300 milímetros, e é adicionado um comprimento de seis centímetros, de cada lado, para a fixação dessa barra através de parafusos.

Em seguida, as rotinas simplesmente repetem o processo de geração do que foi desenhado em um módulo da estrutura para o restante da edificação, na direção das terças. A Fig. 3.18 ilustra o resultado final da representação gráfica da rotina *lcorrente2*, para uma estrutura de 44,0 metros de comprimento, com distância entre treliças de 5,5 metros, com ambos os fechamentos realizados em alvenaria.

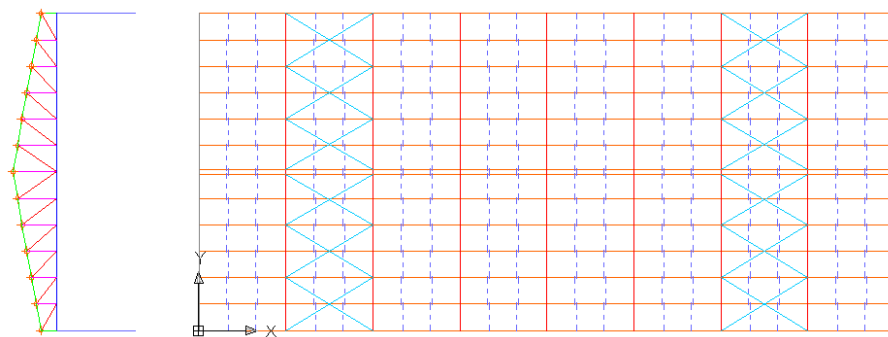


Figura 3.18: Representação gráfica das linhas de corrente em uma edificação, gerada automaticamente.

3.3.5 Geração dos Cortes na Estrutura

O programa realiza automaticamente dois cortes na estrutura: o primeiro, denominado “Corte A-A”, que será próximo à primeira barra do banzo superior, e é o responsável por exibir os detalhes dos pilares metálicos com seus respectivos contraventamentos, além de exibir os detalhes do contraventamento da primeira barra do banzo superior. O segundo corte, denominado “Corte B-B”, será posicionado no eixo de simetria da edificação, ilustrando as barras que realizam o contraventamento das barras do banzo inferior no centro da treliça em estudo.

A representação gráfica do Corte A-A é facilitada, pois os contraventamentos que existirão nos pilares metálicos estarão posicionados nos mesmos módulos que os contraventamentos dos banzos superiores da cobertura da edificação. Como o programa já tem a rotina para a determinação da posição dos contraventamentos, a rotina que realizará a representação gráfica do Corte A-A apenas busca na memória esse valor para realizar o contraventamento dos pilares metálicos.

O primeiro passo do programa é posicionar o desenho dos cortes na planta de contraventamentos. A distância entre a prancha de contraventamentos e a representação dos cortes é dada em função da altura projetada do primeiro montante, dada pela variável HP da Tab. 3.1.

Em seguida, a rotina realiza a representação gráfica dos pilares. Para isso, o programa verifica se os fechamentos da edificação são feitos em alvenaria ou em estrutura metálica. Essa

escolha é feita de forma simples através do comando *if*, o comando condicional da linguagem AutoLISP. Se o fechamento for em alvenaria, a altura do pilar de extremidade será dada pela soma de duas variáveis: *ALTURA* (que representa a altura dos pilares) e *HP* (que representa a altura projetada do primeiro montante), dados pela Tab. 3.1. Se o fechamento da edificação for em estrutura metálica, a altura do pilar de extremidade da estrutura será dada pela variável *ALTURA*, e haverá também a representação da primeira barra do banzo superior em cima do pilar, que terá altura *HP*.

No próximo passo, o programa realiza a representação gráfica dos pilares intermediários, através do comando *repeat*, que é o comando de repetição do AutoLISP. A Fig. 3.19 ilustra a representação dos pilares no Corte A-A, para uma estrutura de 40,0 metros de comprimento, vão livre de 20,0 metros e distância entre pilares de 5,0 metros. Um dos fechamentos é realizado em alvenaria, e o outro em estrutura metálica: por esse motivo, pode-se observar a barra do banzo superior representada sobre esse pilar de extremidade.



Figura 3.19: Representação dos pilares no Corte A-A.

Em seguida, o programa realiza o desenho das terças no corte da estrutura. Trata-se de um procedimento muito simples, onde, através do comando *repeat*, o programa automaticamente desenha linhas, no *layer* terças, a cada pilar. A Fig. 3.20 ilustra esse caso, com o posicionamento das terças no corte da mesma estrutura da Fig. 3.19.



Figura 3.20: Representação das terças no Corte A-A.

O próximo passo do programa é realizar a representação gráfica das barras do banzo superior no corte. A rotina direciona o procedimento em sub-rotinas, dependendo do tipo de fechamento escolhido pelo usuário. Em seguida, o programa apenas usa o comando *repeat*

para repetir o desenho das barras do banzo superior sobre cada pilar intermediário. O comprimento dessa barra também é dado pela variável HP da Tab. 3.1. A Fig. 3.21 ilustra a representação das barras do banzo superior no corte da estrutura.



Figura 3.21: Representação das barras do banzo superior no Corte A-A.

Em seguida, o programa realiza o contraventamento da primeira barra do banzo superior. O posicionamento desses contraventamentos é feito da mesma forma que o descrito em 3.3.3, ou seja, primeiramente o programa realiza os contraventamentos nas barras do banzo superior de extremidade, para depois realizar os contraventamentos internos, quando eles são necessários. Se o ângulo formado entre a altura vertical da barra do banzo superior e o comprimento na horizontal dado pela distância entre treliças for inferior à 15° , o programa realiza o contraventamento através de quatro barras, formando um “M”. Caso o ângulo seja superior à 15° , o contraventamento é feito através de duas barras, em “X”.

Em seguida, o programa irá realizar o contraventamento dos pilares metálicos, representados no Corte A-A, nas mesmas posições onde existem contraventamentos de barras do banzo superior. Deve-se ressaltar que existe uma diferença entre as rotinas que realizam o contraventamento das barras do banzo superior para as que realizam o contraventamento dos pilares metálicos. Essa diferença se deve ao fato do ângulo máximo permitido entre a barra do contraventamento e a horizontal ser limitado em 50° , casos normalmente encontrados quando a altura dos pilares é elevada. Ou seja, o contraventamento dos pilares é função da altura dos pilares e da distância entre treliças fornecidas pelo usuário. Se o ângulo for inferior à 50° , o programa simplesmente realiza o contraventamento com um “X”, do início ao fim do pilar metálico. Caso o ângulo formado entre a distância entre treliças e a altura dos pilares seja superior à 50° , o programa realiza longarinas metálicas, compreendendo todo o comprimento da edificação. Entre essas longarinas o programa realiza contraventamentos em “X”.

As Figuras 3.22 e 3.23 ilustram os dois casos: no primeiro, o contraventamento dos pilares é feito simplesmente com um “X”, e no segundo, pode-se ver a longarina metálica que cruza a estrutura, resultando em contraventamentos mais adequados. Para a Fig. 3.22, a

altura dos pilares e a distância entre treliças é de 5,0 metros, que resultam em um ângulo de 45° . Para a Fig. 3.23, a altura dos pilares é de 6,0 metros, e a distância entre treliças é de 4,0 metros, que resultam em um ângulo superior à 56° . Com a introdução da longarina metálica, esse ângulo é reduzido para 37° . Nos dois exemplos, o comprimento da edificação é de 40,0 metros, e ambos os fechamentos são feitos em alvenaria.

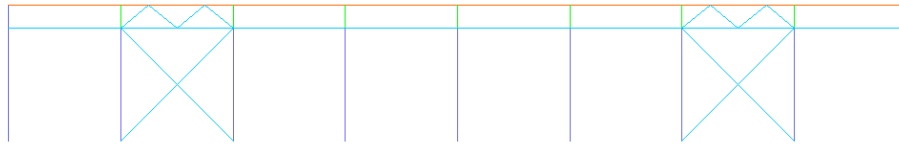


Figura 3.22: Contraventamento dos pilares metálicos, em “X”.

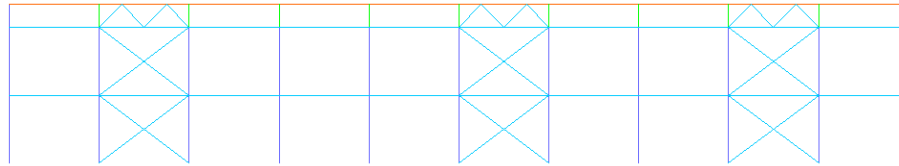


Figura 3.23: Contraventamento dos pilares, onde foi necessária a introdução de uma longarina metálica.

Com isso, o programa finaliza a representação gráfica do “Corte A-A”, e vai para a próxima etapa, que é a representação gráfica do corte no meio da treliça, chamado “Corte B-B”.

O Corte B-B é iniciado com seu posicionamento na tela do AutoCAD. Esse corte será posicionado abaixo do Corte A-A, e a distância entre eles se dá em função da altura projetada HP , dado pela Tab. 3.1. O próximo passo da rotina é representar as barras do banzo superior no corte. O comprimento dessas barras é dado através do comando *distance* do AutoLISP, que fornece a distância entre dois pontos conhecidos. No caso, o comprimento das barras é dado através da distância entre o PONTO 3 e o PONTO 4, já definidos em 3.3.2. Caso o fechamento da estrutura seja em alvenaria, o programa não representa a barra da treliça nesta extremidade.

Em seguida, o programa representa a terça no corte, cujo comprimento será o comprimento total da estrutura. A Fig. 3.24 ilustra a representação do Corte B-B, até o momento. O comprimento da estrutura é de 40,0 metros, a distância entre treliças é de 5,0 metros, um dos fechamentos é em alvenaria e o outro em estrutura metálica.



Figura 3.24: Representação das barras do banzo superior e da terça no Corte B-B.

Logo depois, o programa executa a última tarefa, que é o contraventamento do Corte B-B, nos mesmos módulos onde existem contraventamentos no Corte A-A e na planta da estrutura. O procedimento para a localização desses contraventamentos é o mesmo que o descrito anteriormente. Da mesma forma que o Corte A-A, caso o ângulo formado entre a altura da treliça e a distância entre treliças seja superior a 15° , o programa faz o contraventamento em “X”, e em caso contrário, em “M”. A Fig. 3.25 ilustra os contraventamentos do Corte B-B, para os mesmos dados de entrada da Fig. 3.24.

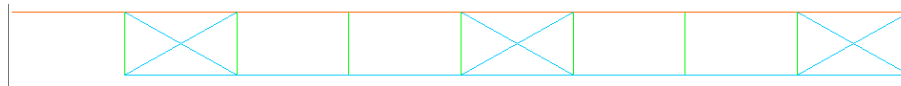


Figura 3.25: Resultado final do Corte B-B.

Em seguida, o programa realiza os últimos detalhes na prancha de contraventamentos da estrutura. O programa realiza a indicação dos cortes na planta, e plota, através do comando *text* do AutoLISP, dados importantes da estrutura, como a altura da treliça no meio do vão, o intervalo de ângulos da treliça e os maiores comprimentos das barras do banzo superior e inferior, além da distância entre terças da edificação. A Fig. 3.26 ilustra o resultado final desta rotina, para os seguintes dados de entrada:

- Vão livre: 20,0 metros;
- Ângulo de Arranque: $90,0^\circ$;
- Inclinação do Banzo Superior: $10,0^\circ$;
- Inclinação do Banzo Inferior: $0,0^\circ$;
- Altura Projetada do Primeiro Montante: 1,0 metro;
- Máxima Distância entre Terças: 2,0 metros;
- Altura dos Pilares: 5,0 metros;

- Comprimento Total da Estrutura: 40,0 metros;
- Distância entre Treliças: 5,0 metros;
- O Fechamento Frontal é feito em Alvenaria; o outro, em Estrutura Metálica.

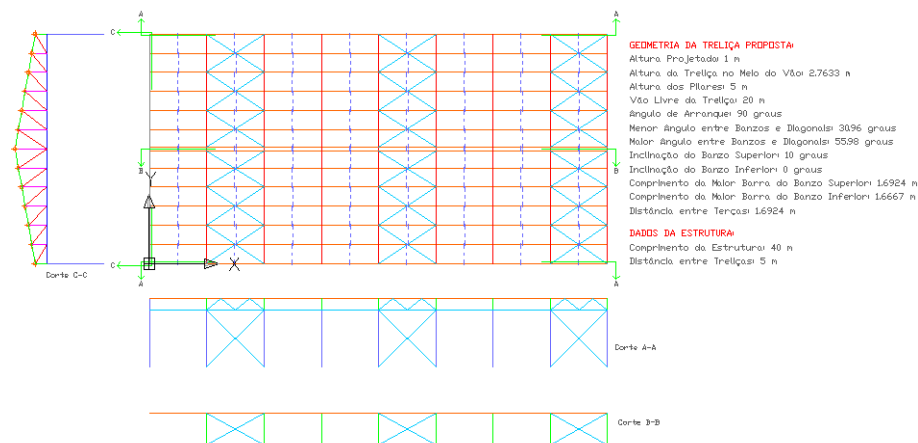



Figura 3.26: Resultado final da rotina de duas águas.

3.4 Rotina de Treliças de Banzos Paralelos

3.4.1 Geração da Geometria da Treliça

A rotina de treliças de banzos paralelos, que corresponde ao arquivo *thp.lsp* é a responsável por realizar o projeto de um galpão de cobertura formada por treliças de banzos paralelos. A rotina avalia os dados de entrada do usuário e, com eles, realiza o projeto estrutural automaticamente. Todo o processo é otimizado e automático. Além disso, as rotinas utilizam caixas de diálogo que explicam claramente os dados necessários para que o projeto seja realizado com sucesso. Para iniciar o programa, é necessário ao usuário clicar no ícone referente à rotina de treliças de banzos paralelos, , ou digitar na tela de textos do AutoCAD o comando *thp*. Com isso, o AutoCAD abrirá automaticamente uma caixa de diálogos como a da Fig. 3.27 abaixo, pedindo ao usuário os seguintes dados de entrada:

- Vão livre da estrutura, em metros;

- Ângulo de arranque da estrutura, em graus;
- Inclinação dos banzos da treliça, em graus;
- Distância entre Banzos, em metros;
- Máxima distância entre terças, em metros;
- Altura dos pilares, em metros;
- Tipo da treliça a ser realizada, 1 ou 2.

A caixa de diálogo intitulada "Dados para Geometria da Treliza" apresenta os seguintes campos de entrada:

- Vão Livre da Treliza (m)
- Ângulo de Arranque (graus)
- Inclinação dos Banzos (graus)
- Distância entre Banzos (m)
- Máxima Distância entre Terças (m)
- Altura dos pilares (m)
- Tipo (1) ou (2)?

Obs: distância máxima entre terças obtida em função da telha utilizada

Botões: OK, Cancel

Figura 3.27: Caixa de Diálogo do AutoCAD, pedindo os dados de entrada do programa.

Os dados de entrada serão armazenados em variáveis, conforme a Tab. 3.6.

Tabela 3.6: Lista de variáveis para os dados de entrada, na rotina de treliças de banzos paralelos.

| Dado de Entrada | Variável |
|-------------------------------|-----------|
| Vão Livre | VAO |
| Ângulo de Arranque | ANGULO |
| Inclinação dos Banzos | INC |
| Distância entre Banzos | DB |
| Máxima Distância entre Terças | ESPACOMAX |
| Altura dos Pilares | ALTURA |
| Tipo da Treliza | RES |

A Figura 3.28 irá mostrar o que cada um dos dados de entrada representa no desenho da treliça de banzos paralelos.

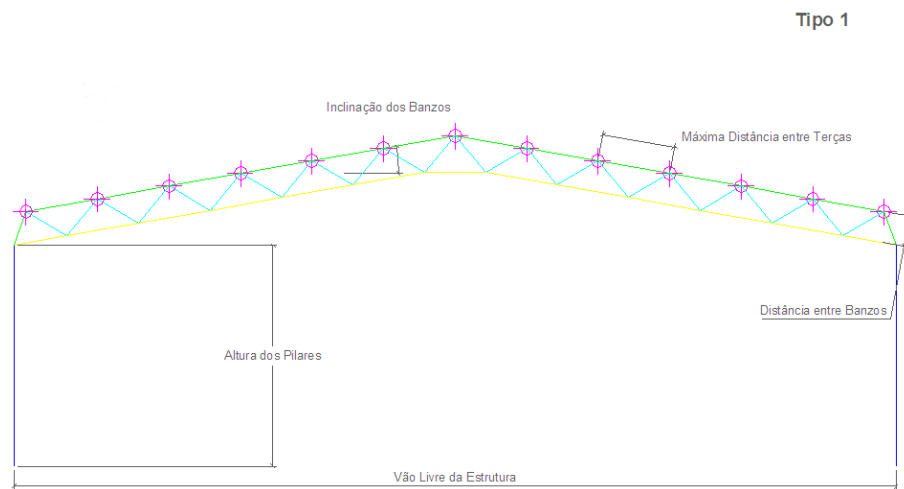


Figura 3.28: Dados de entrada da rotina de Treliças de Duas Águas.

A rotina de treliças de banzos paralelos apresenta dois tipos de geometria. A diferença entre elas é o arranjo das barras no centro da treliça. A Fig. 3.29 ilustra essa diferença, para os mesmos dados de entrada.

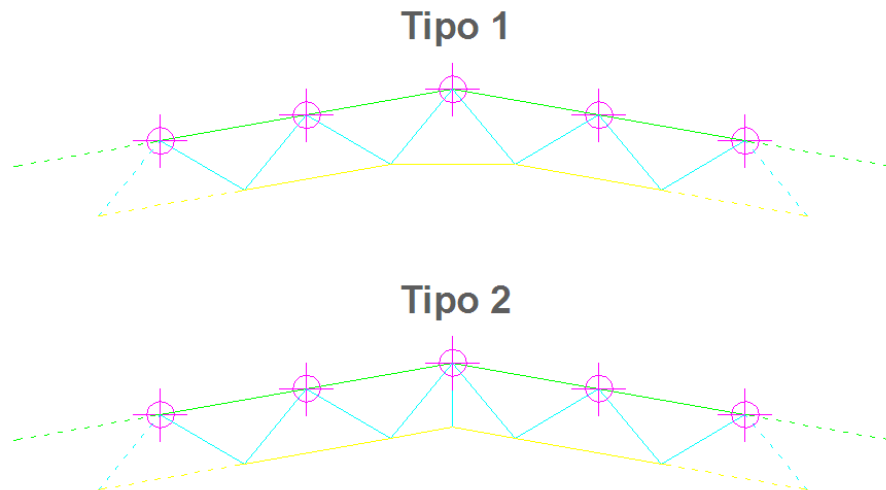


Figura 3.29: Diferenças dos Tipos 1 e 2 da rotina de treliças de banzos paralelos.

Com esses dados de entrada, o programa irá automaticamente realizar o desenho da treliça de banzos paralelos, indicando o posicionamento das terças na treliça, e será capaz de exportar esses dados para um programa CAE, o *AutoMETAL*, por um arquivo de extensão *dxg*.

3.4.2 Análise dos Dados de Entrada e Execução do Projeto da Treliça

Quando o usuário clica em *OK* na caixa de diálogo da Fig. 3.27, a rotina avalia a validade dos dados de entrada. De início, se a máxima distância entre terças for zero ou um valor negativo, o programa é encerrado com um alerta ao usuário, explicando que esse valor deve ser positivo e diferente de zero. Outras avaliações da validade dos dados de entrada serão feitas mais adiante no programa, conforme será apresentado ainda neste capítulo.

A seguir, o programa apaga tudo o que está na tela, antes de realizar o projeto da treliça. Isso faz com que caso o usuário queira alterar os dados de entrada ou iniciar um novo projeto, será possível repetir o processo automaticamente, sem que haja sobreposição. Em seguida, o programa irá criar os *layers* necessários ao desenho da treliça: *BzoSup* (*layer* referente ao Banzo Superior), *BzoInf* (*layer* referente ao Banzo Inferior), *Diagonais*, *Pilares*, *Terças*, e finalmente, *Texto*.

Em seguida, do mesmo modo que a rotina de duas águas, o programa determina o ponto chamado ORIGEM, de coordenada (0,0). Feito isso, o programa vai descobrir as coordenadas do ponto de encontro da primeira com a segunda barra do banzo superior, chamado de PONTO 2, em função do ângulo de arranque e da distância entre banzos, da seguinte forma:

$$A2 = ANGULO - INC \quad (3.6)$$

Atribui-se à variável *A2* o valor da subtração entre o ângulo de arranque e a inclinação dos banzos;

$$HIP = \frac{DB}{\sin A2} \quad (3.7)$$

Esse será o valor da distância entre a ORIGEM e o PONTO 2.

Em seguida, o programa calcula o valor da altura da treliça no meio do vão, até o banzo inferior, e o armazena na variável *CO* como sendo:

$$CO = \frac{\sin INC}{\cos INC} \cdot \frac{VAO}{2} \quad (3.8)$$

Outro ponto importante na estrutura da treliça é armazenado em seguida, chamado PONTO 3, que terá coordenadas $(\frac{VAO}{2}, CO)$.

Em seguida, o programa armazena as seguintes variáveis:

$$HP = HIP \cdot \cos ANGULO \quad (3.9)$$

$$CA = \cos ANGULO \cdot HIP = \quad (3.10)$$

$$CA2 = \frac{VAO}{2} - CA \quad (3.11)$$

$$CO2 = \frac{\sin INC}{\cos INC} \cdot CA2 \quad (3.12)$$

Com essas variáveis armazenadas, o programa tem as informações suficientes para calcular as coordenadas do PONTO 4, que é a altura da treliça no meio do vão, no banzo superior: $(\frac{VAO}{2}, HP + CO2)$.

A Figura 3.30 ilustra o posicionamento dos pontos calculados até agora no desenho de uma treliça de banzos paralelos genérica.

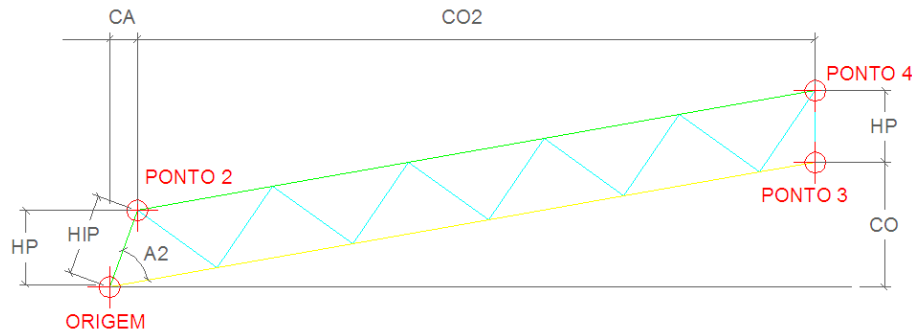


Figura 3.30: Localização de pontos importantes no desenho da treliça.

Com as coordenadas dos pontos externos da treliça definidas, o programa tem condição de calcular o posicionamento das terças, em função da máxima distância entre terças escolhida pelo usuário. O procedimento é o mesmo descrito no item 3.3.2.

Com as terças definidas, o programa realiza um processo iterativo para o posicionamento das diagonais. Se o ângulo formado entre as diagonais e o banzo inferior estiver entre 40° e 60° , intervalo sugerido em 2.2.1.2, o programa posiciona duas diagonais entre cada terça, conforme a Fig. 3.31. Nesse caso, os dados de entrada foram: vão livre: 20,0 metros; ângulo de arranque: 90° ; inclinação dos banzos: 12° ; distância entre banzos: 0,8 metro; máxima distância entre terças: 2,0 metros; altura dos pilares: 5,0 metros e finalmente, tipo de treliça: (1).

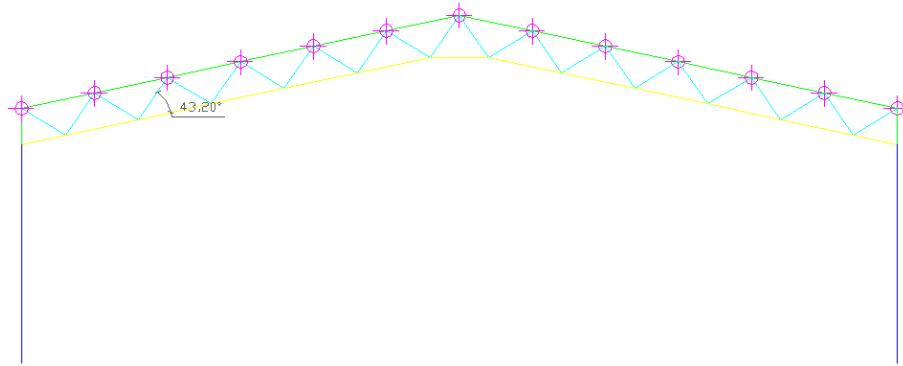


Figura 3.31: Projeto da treliça, ilustrando o ângulo entre as diagonais e banzos.

Caso o ângulo entre as diagonais e o banzo inferior seja superior à 60° , o programa abre um alerta ao usuário, aconselhando-o a diminuir a distância entre banzos e a aumentar a máxima distância entre terças. Feito isso, o programa é reiniciado.

Caso o ângulo entre as diagonais e o banzo inferior seja inferior à 30° , o programa tenta alterar a estrutura, colocando quatro diagonais alternadas entre cada terça, com o objetivo de aumentar esse ângulo. A Fig. 3.32 ilustra esse caso, fazendo o novo arranjo das diagonais, para os seguintes dados de entrada: vão livre: 20,0 metros; ângulo de arranque: 90° ; inclinação dos banzos: 12° ; distância entre banzos: 0,6 metro; máxima distância entre terças: 2,0 metros; altura dos pilares: 5,0 metros e finalmente, tipo de treliça (1). Neste exemplo numérico específico, o novo ângulo entre diagonais e banzos vale $54,63^\circ$, dentro do intervalo proposto. Se nesse novo arranjo, o ângulo entre as diagonais e banzos ficar fora do

intervalo proposto em 2.2.1.2, o programa alerta o usuário a incompatibilidade dos dados de entrada e automaticamente reinicia o programa.

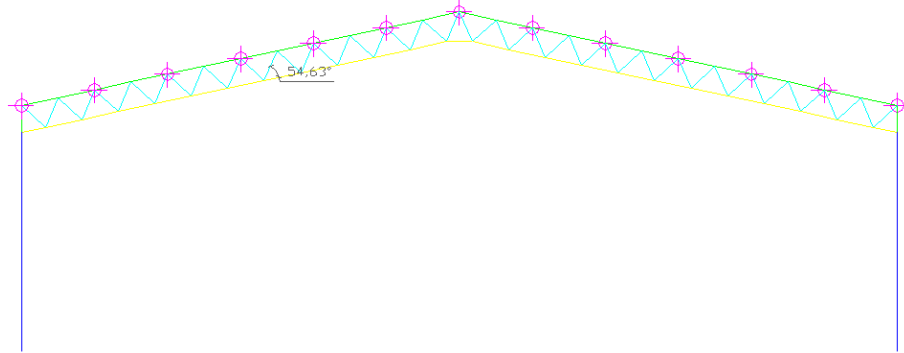


Figura 3.32: Novo arranjo das diagonais, aumentando o ângulo entre as diagonais e o banco inferior.

Assim, o usuário tem a opção de aceitar ou não a treliça resultante. Caso o usuário não aceite, o processo é reiniciado, pedindo-se novamente os dados de entrada ao usuário. Nessa segunda tentativa, a caixa de diálogo inicial vai aparecer preenchida com os últimos dados de entrada. Dessa maneira, ele tem a possibilidade de rever o que foi digitado, facilitando a alteração dos dados.

3.4.3 Geração da Planta de Contraventamentos da Estrutura

O próximo passo da rotina de treliças de bancos paralelos é realizar a prancha de contraventamentos da estrutura com as linhas de corrente e seus respectivos cortes. O procedimento da realização dessa prancha é o mesmo que o descrito em 3.3.3, e por esse motivo, não será descrito novamente. A única diferença encontra-se na representação gráfica do Corte B-B: na rotina de treliças de bancos paralelos, o contraventamento dos módulos é feito através de mãos francesas, cujo ângulo com a horizontal será sempre 60° . A Fig. 3.33 é o resultado do processamento da rotina de treliças de bancos paralelos, para os seguintes dados de entrada, com o objetivo de ilustrar um exemplo numérico.

- Vão livre: 20,0 metros;
- Ângulo de Arranque: 90,0°;
- Inclinação dos Banzos: 10,0°;
- Distância entre Banzos: 1,0 metro;
- Máxima Distância entre Terças: 2,0 metros;
- Altura dos Pilares: 5,0 metros;
- Tipo de Treliça desejada: 1;
- Comprimento Total da Estrutura: 40,0 metros;
- Distância entre Treliças: 5,0 metros;
- O Fechamento Frontal é feito em Alvenaria; o outro, em Estrutura Metálica.

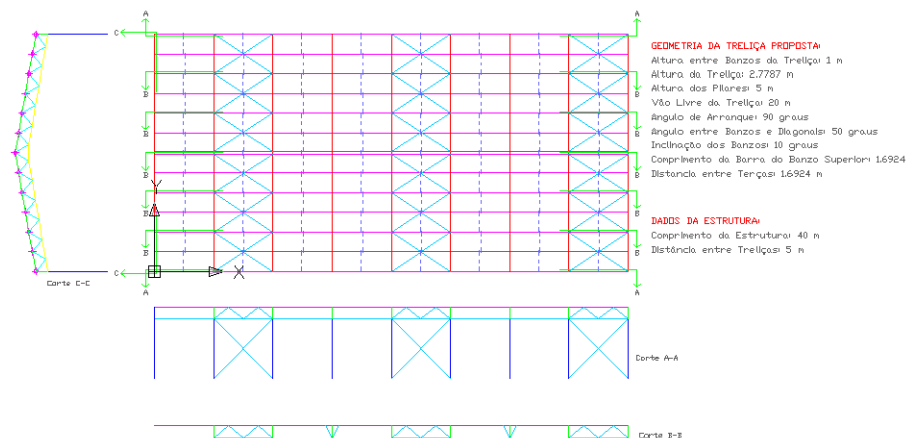



Figura 3.33: Resultado final da rotina de banzos paralelos.

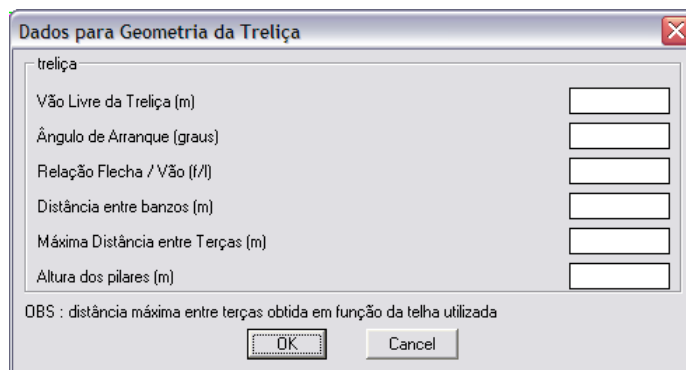
3.5 Rotina de Treliças de Arcos Circulares

3.5.1 Geração da Geometria da Treliça

A rotina de treliças de arcos circulares, que corresponde ao arquivo *tac.lsp* é a responsável por realizar o projeto de um galpão de cobertura formada por treliças de arcos

circulares. A rotina avalia os dados de entrada do usuário e, com eles, realiza o projeto estrutural automaticamente. Todo o processo é otimizado e automático. Além disso, as rotinas utilizam caixas de diálogo que explicam claramente os dados necessários para que o projeto seja realizado com sucesso. Para iniciar o programa, é necessário ao usuário clicar no ícone referente à rotina de treliças de banzos paralelos, , ou digitar na tela de textos do AutoCAD o comando *tac*. Com isso, o AutoCAD abrirá automaticamente uma caixa de diálogos como a da Fig. 3.34 abaixo, pedindo ao usuário os seguintes dados de entrada:

- Vão livre da estrutura, em metros;
- Ângulo de arranque da estrutura, em graus;
- Relação Flecha / Vão (f/L) da estrutura;
- Distância entre Banzos, em metros;
- Máxima distância entre terças, em metros;
- Altura dos pilares, em metros.



Dados para Geometria da Treliza

treliza

Vão Livre da Treliza (m)

Ângulo de Arranque (graus)

Relação Flecha / Vão (f/l)

Distância entre banzos (m)

Máxima Distância entre Terças (m)

Altura dos pilares (m)

OBS : distância máxima entre terças obtida em função da telha utilizada

OK Cancel

Figura 3.34: Caixa de Diálogo do AutoCAD, pedindo os dados de entrada do programa.

Os dados de entrada serão armazenados em variáveis, conforme a Tab. 3.7.

Tabela 3.7: Lista de variáveis para os dados de entrada, na rotina de treliças de arcos circulares.

| Dado de Entrada | Variável |
|-------------------------------|-----------|
| Vão Livre | VAO |
| Ângulo de Arranque | ANGULO |
| f/L | FVAO |
| Distância entre Banzos | D |
| Máxima Distância Entre Terças | ESPACOMAX |
| Altura dos Pilares | ALTURA |

Com esses dados de entrada, o programa irá automaticamente realizar o desenho da treliça de arcos circulares, indicando o posicionamento das terças na treliça, e será capaz de exportar esses dados para um programa CAE, o *AutoMETAL*, por um arquivo de extensão *dxg*.

3.5.2 Análise dos Dados de Entrada e Execução do Projeto da Treliça

Com os dados de entrada do usuário, o programa armazena as coordenadas de pontos importantes na geometria da treliça. A partir desses pontos e com os dados de entrada do usuário, o programa terá como realizar o projeto da treliça. Esses pontos foram calculados usando o recurso de coordenadas polares, ou seja: para se determinar a coordenada de um ponto, são necessárias três informações:

- Uma referência (coordenadas cartesianas de outro ponto);
- A distância do ponto desejado à referência;
- O ângulo entre a referência e o ponto desejado.

A Figura 3.35 ilustra a possibilidade da obtenção das coordenadas (x_i, y_i) de um ponto a partir de outro ponto (referência), de coordenadas (x_0, y_0) .

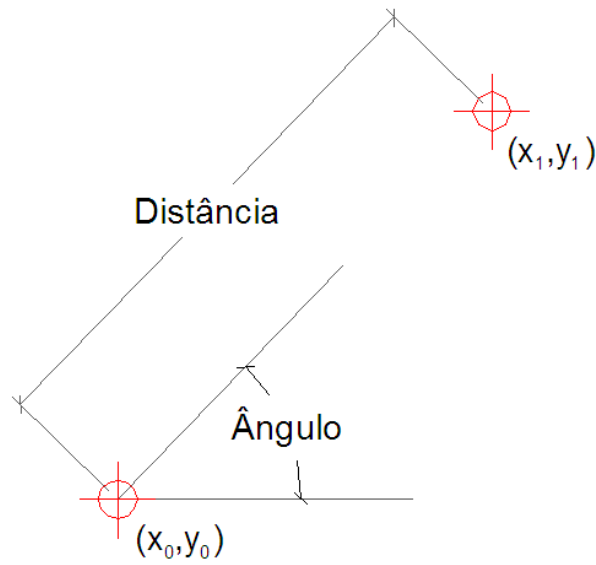


Figura 3.35: Funcionamento da teoria de coordenadas polares.

Dessa forma, o programa armazena as variáveis PONTO 2, PONTO 3 e PONTO 4, conforme a Tab. 3.8.

Tabela 3.8: Coordenadas de pontos no projeto da geometria da treliça.

| | Referência | Distância | Ângulo |
|---------|------------|-----------|--------|
| PONTO 2 | ORIGEM | $VAO / 2$ | 0 |
| PONTO 3 | PONTO 2 | F | 90° |
| PONTO 4 | PONTO 3 | D | 90° |

tal que F é a flecha da treliça, obtida da relação flecha / vão (f/L) e D é a distância entre banzos fornecida pelo usuário.

A Figura 3.36 ilustra a posição desses pontos no desenho da treliça, além de mostrar algumas distâncias conhecidas. A posição real do centro do arco de circunferência é abaixo do que está representado na Fig. 3.36, e só foi colocada neste local com o objetivo de melhorar a definição da imagem.

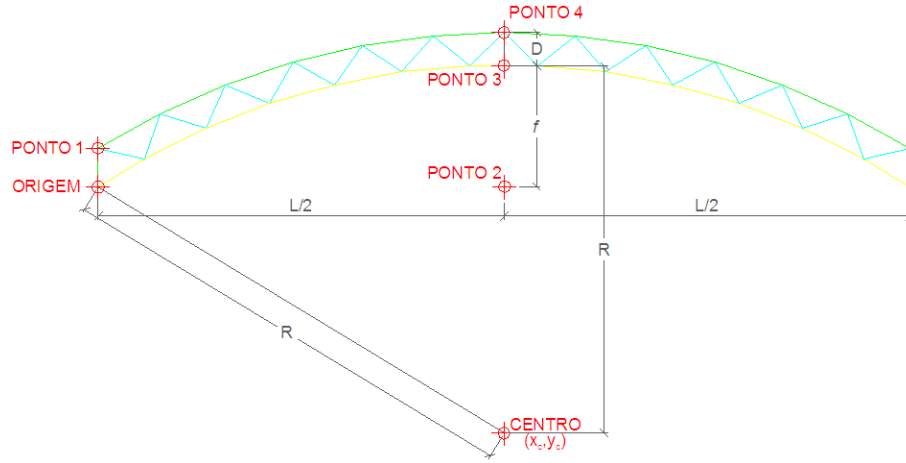


Figura 3.36: Localização dos pontos na treliça de arcos circulares.

Em seguida, o programa calcula os raios dos arcos da estrutura, tanto do banzo inferior quanto do banzo superior. Sabendo-se que a equação de uma circunferência é dada pela equação 3.13, e sabendo-se as coordenadas cartesianas do centro da circunferência (em função do vão livre e da relação flecha / vão da estrutura) e de um ponto que pertence à circunferência (no caso a ORIGEM, de coordenada (0,0)), o raio da circunferência do banzo inferior é dado por 3.14.

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R^2 \quad (3.13)$$

$$R_I^2 = (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2$$

$$R_I^2 = (0 - L/2)^2 + (0 - (R_I - f))^2$$

$$R_I^2 = (L/2)^2 + (R_I - f)^2$$

$$R_I^2 = (L/2)^2 + R_I^2 - 2 \cdot R_I \cdot f + f^2$$

$$2 \cdot R_I \cdot f = f^2 + (L/2)$$

$$R_I = \frac{f^2 + (L/2)}{2 \cdot f} \quad (3.14)$$

tal que (x, y) é a coordenada da ORIGEM $(0,0)$, (x_c, y_c) é a coordenada do centro da circunferência $(L/2, R - f)$, f é a flecha da estrutura e L é o vão livre.

O raio da circunferência do banzo superior é simplesmente a soma do raio da circunferência do banzo inferior com o valor da distância entre banzos:

$$R_S = R_I + D$$

tal que D é a distância entre banzos.

Em seguida, o programa calcula a coordenada do centro do arco circular, que será armazenada na variável CENTRO. O cálculo é feito através de coordenadas polares: a referência é o PONTO 2, o ângulo é 270° e o comprimento é a diferença entre o raio do arco inferior com a flecha, ou seja, $(R_I - f)$.

O próximo passo do programa é calcular as coordenadas do PONTO 1, (x_{P1}, y_{P1}) , que é o ponto da intersecção entre a primeira e a segunda barra do banzo superior. Ou seja, pode-se observar que o PONTO 1 é a intersecção de uma reta, que passa pela ORIGEM e tem inclinação definida através do ângulo de arranque, e de uma circunferência, cujo centro e raio já são definidos. a Fig. 3.37 ilustra o PONTO 1 em detalhe.

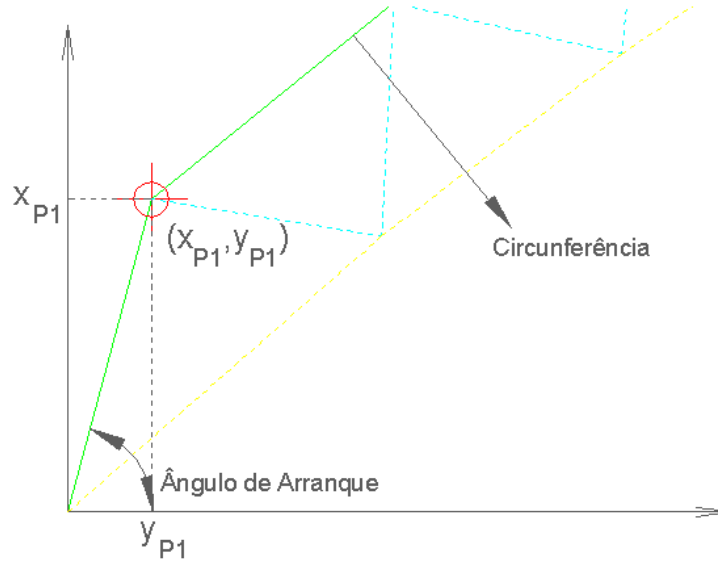


Figura 3.37: Detalhe do PONTO 1.

A equação da reta é dada através do ângulo de arranque da estrutura:

$$\tan(ANGULO) = \frac{y_{P1}}{x_{P1}}$$

$$y_{P1} = \tan(ANGULO) \cdot x_{P1} \quad (3.15)$$

A equação da circunferência, que passa pelo PONTO 1, cujo centro e raio são definidos respectivamente por (x_C, y_C) e R_S é dada por:

$$(x_{P1} - x_C)^2 + (y_{P1} - y_C)^2 = R_S^2 \quad (3.16)$$

Resolvendo o sistema de duas incógnitas para as equações 3.15 e 3.16, tem-se duas raízes definidas:

$$x_{P1} = \frac{x_C + y_C \cdot TG + \sqrt{-y_C^2 + R_S^2 + 2 \cdot x_C \cdot y_C \cdot TG - x_C^2 \cdot TG^2 + R_S^2 \cdot TG^2}}{1 + TG^2} \quad (3.17)$$

$$x_{P1} = \frac{x_C + y_C \cdot TG - \sqrt{-y_C^2 + R_S^2 + 2 \cdot x_C \cdot y_C \cdot TG - x_C^2 \cdot TG^2 + R_S^2 \cdot TG^2}}{1 + TG^2} \quad (3.18)$$

tal que TG é a tangente do ângulo de arranque.

A explicação de existirem duas raízes para a solução do sistema se deve ao fato de que uma reta pode interceptar uma circunferência em até dois pontos. Foi implementado na rotina de treliças de arcos circulares o cálculo dessas duas raízes: a primeira delas, dada por 3.17, ocorre quando o ângulo de arranque é menor ou igual a 90° ; a segunda, dada por 3.18, ocorre quando o ângulo de arranque é maior que 90° .

Para a determinação da coordenada y_{P1} , basta retornar o valor obtido em 3.17 ou 3.18 na Eq. 3.15.

Em seguida, o programa calcula o comprimento do arco circular. Esse valor torna-se necessário, já que sem ele não é possível posicionar as terças de acordo com o proposto pelo usuário. O programa calcula, na verdade, o comprimento do arco do banzo superior, da sua origem, dado pelo PONTO 1, até o eixo de simetria da estrutura, dado pelo PONTO 4.

Sabendo-se que o comprimento de um arco circular δ é obtido através da multiplicação do seu ângulo α pelo seu raio, tem-se:

$$\alpha = \arctan \frac{(x_{P2} - x_{P1})}{(y_{P1} - y_C)}$$

$$\delta = \alpha \cdot R_S \quad (3.19)$$

Determinado o comprimento do banzo superior, pode-se agora estabelecer quantas terças serão dispostas na treliça, através da máxima distância entre terças fornecida pelo usuário. Para isso, o programa divide o comprimento δ pela máxima distância entre terças. Se o quociente encontrado não for um número inteiro, a quantidade de barras do banzo superior que respeitam a máxima distância entre terças imposta pelo usuário será o quociente mais uma barra.

Para determinar a posição das terças no banzo superior, o algoritmo desenvolvido baseia-se na única variável que se mantém a mesma em toda a treliça: o ângulo β formado entre as terças e o centro (x_C, y_C) da circunferência. O programa calcula β simplesmente dividindo o ângulo α pela metade do número de barras que pertencem ao banzo superior calculado anteriormente. A Fig. 3.38 ilustra a obtenção do ângulo β .

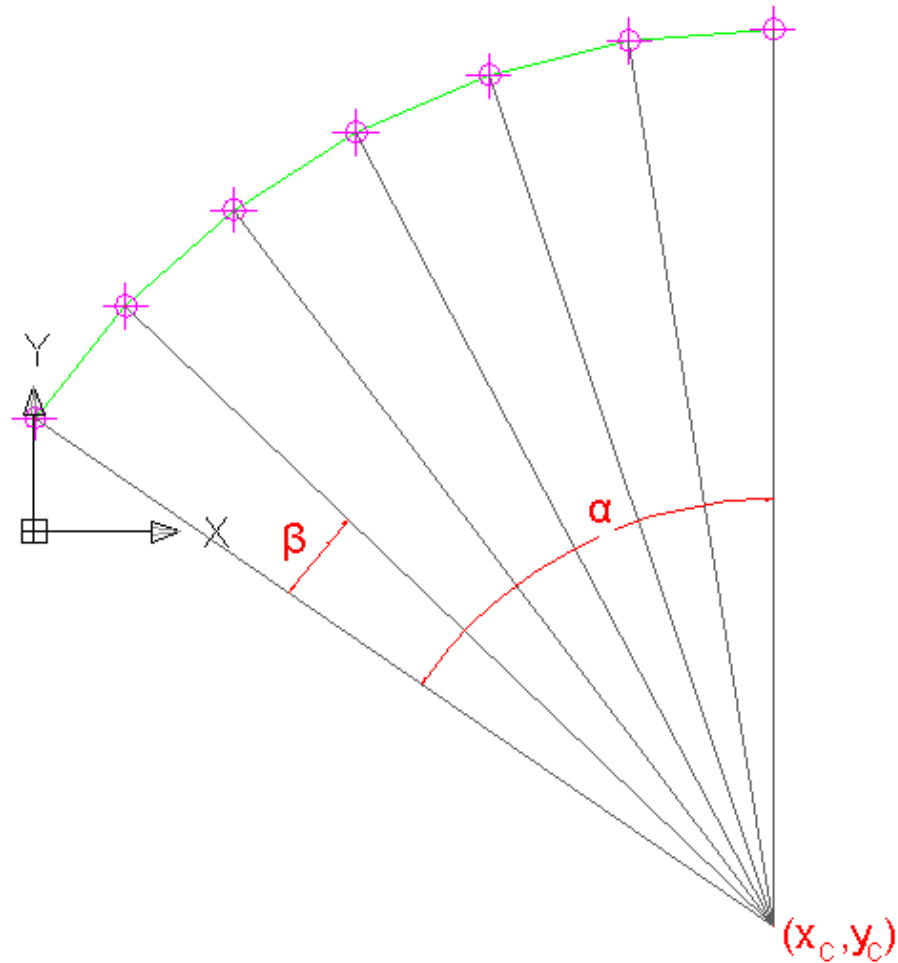


Figura 3.38: Determinação do ângulo β .

Com o ângulo β calculado, o algoritmo para a representação gráfica da treliça é utilizar o comando *repeat*, que irá repetir n vezes o desenho de um módulo da treliça, composto por uma barra do banzo superior, uma do banzo inferior e duas diagonais, em torno do centro do arco, tal que n é o número de barras do banzo superior. O incremento de cada repetição é dado pela soma do ângulo inicial com β . Em seguida, o programa faz a representação gráfica dos pilares, no respectivo *layer*. A Fig. 3.39 ilustra o resultado inicial da rotina de arcos circulares, para uma estrutura de 20,0 metros de vão livre, 90° de ângulo de arranque, relação

f/L igual a 0,15, distância entre banzos de 0,8 metros, a máxima distância entre terças é de 2,0 metros e a altura dos pilares é de 5,0 metros. O texto que aparece na Fig. 3.39 é gerado automaticamente, e tem a finalidade de exibir dados importantes da geometria da treliça ao usuário, como o comprimento de barras e os ângulos formados entre elas.

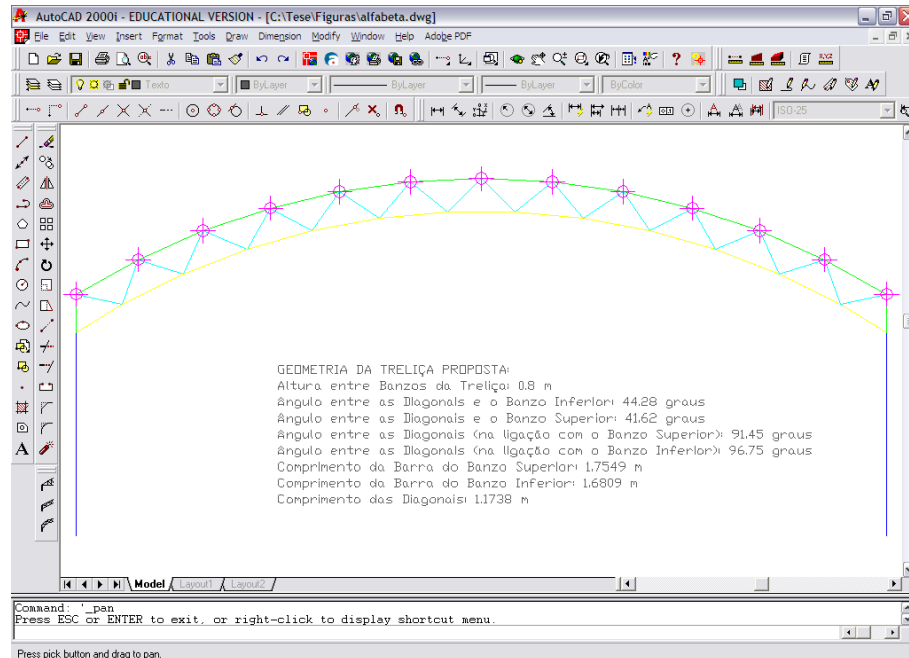


Figura 3.39: Geometria da treliça gerada automaticamente.

Da mesma forma que as outros dois programas, a rotina de treliças de arcos circulares gera alternativas automaticamente, caso os dados de entrada do usuário resultem em uma geometria pouco convencional. A primeira verificação do programa é analisar o ângulo entre as barras das diagonais e as do banzo inferior. Se esse ângulo estiver no intervalo de 40° e 60° , o programa irá posicionar duas diagonais entre cada terça, como no exemplo da Fig. 3.39. Caso o ângulo formado entre as barras das diagonais e as do banzo inferior seja inferior a 40° , que acontece quando a máxima distância entre terças é relativamente alta e a distância entre banzos é pequena, a rotina automaticamente posiciona quatro diagonais entre cada terça, aumentando o ângulo e distribuindo melhor as cargas na treliça. Quando o programa realiza esse tipo de alteração, uma caixa de diálogo surgirá na tela do AutoCAD, alertando o usuário da mudança automática. A Fig. 3.40 ilustra esse caso, para os mesmos dados de entrada da treliça anterior, porém, com uma distância entre terças de 0,5 metro.

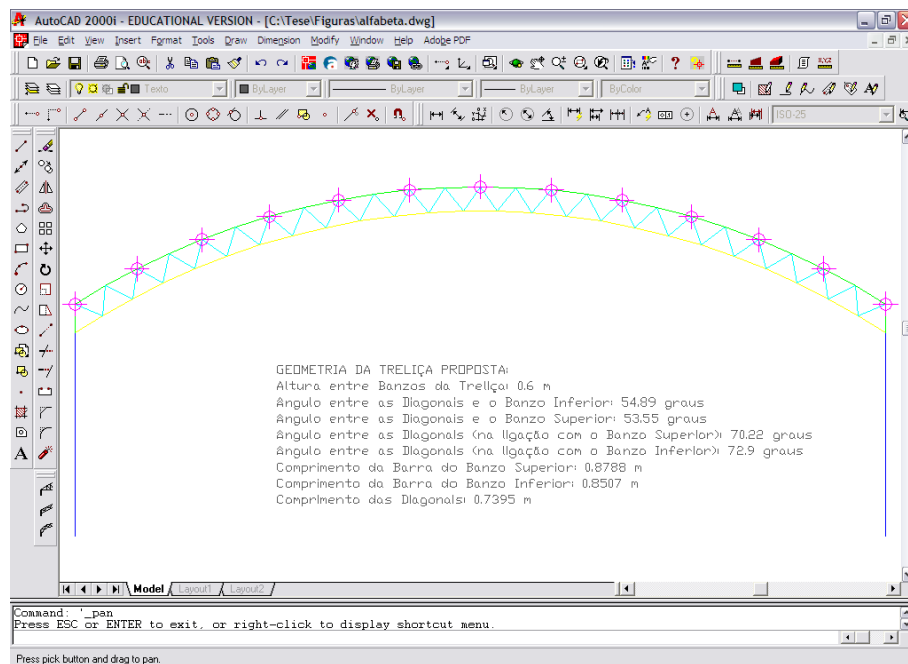


Figura 3.40: Novo arranjo da rotina de arcos circulares, gerado automaticamente.

Assim, o usuário tem a opção de aceitar ou não a treliça resultante. Caso o usuário não aceite, o processo é reiniciado, pedindo-se novamente os dados de entrada ao usuário. Nessa segunda tentativa, a caixa de diálogo inicial vai aparecer preenchida com os últimos dados de entrada. Dessa maneira, ele tem a possibilidade de rever o que foi digitado, facilitando a alteração dos dados.

3.5.3 Geração da Planta de Contraventamentos da Estrutura

O próximo passo da rotina de treliças de arcos circulares é realizar a prancha de contraventamentos da estrutura com as linhas de corrente e seus respectivos cortes. O procedimento da realização dessa prancha é similar aos descritos em 3.3.3 e 3.4.3, e por esse motivo, não será descrito novamente. Uma das poucas diferenças é que nessas edificações existe apenas uma, e não duas terças centrais no eixo de simetria da treliça. Da mesma forma que na rotina de treliças de banzos paralelos, na representação gráfica do Corte B-B, o contraventamento dos módulos é feito através de mãos francesas, cujo ângulo com a horizontal será sempre 60° . A Fig. 3.41 é o resultado do processamento da rotina de treliças de

banzos paralelos, para os seguintes dados de entrada, com o objetivo de ilustrar um exemplo numérico.

- Vão livre: 20,0 metros;
- Ângulo de Arranque: $90,0^\circ$;
- Relação Flecha / Vão (f/L): 0,15;
- Distância entre Banzos: 1,0 metro;
- Máxima Distância entre Terças: 2,0 metros;
- Altura dos Pilares: 5,0 metros;
- Comprimento Total da Estrutura: 40,0 metros;
- Distância entre Treliças: 5,0 metros;
- O Fechamento Frontal é feito em Alvenaria; o outro, em Estrutura Metálica.

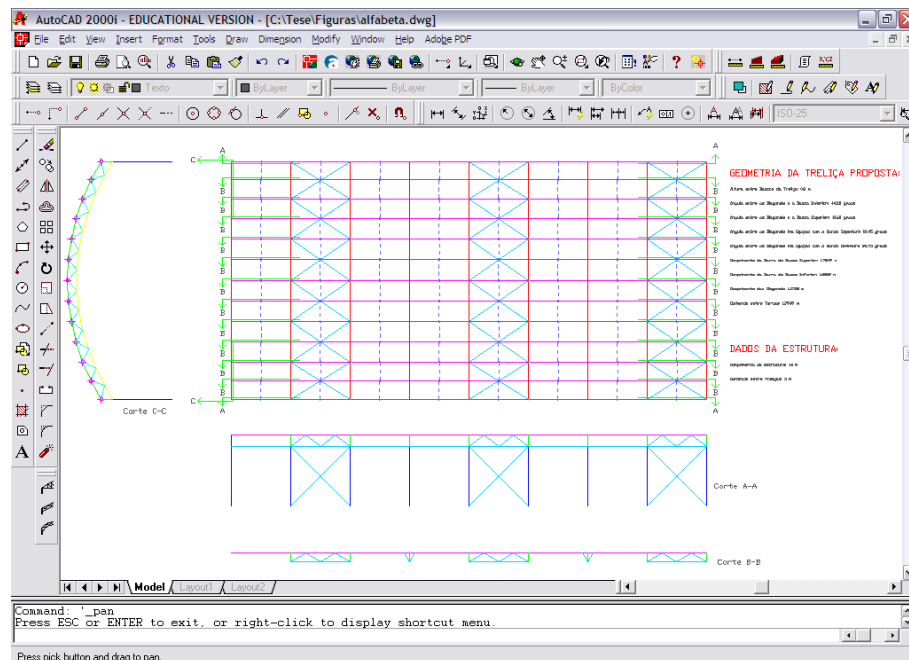


Figura 3.41: Resultado final da rotina de arcos circulares.

Capítulo 4

Integração CAD CAE

Um dos aspectos mais importantes desse trabalho é realizar a integração CAD CAE, ou seja, ligar as rotinas desenvolvidas na linguagem AutoLISP desse trabalho com o que foi desenvolvido no programa *AutoMETAL 1.01 - V&M do Brasil - UNICAMP*, concluído em 2001, que realiza o dimensionamento da estrutura. Como o programa CAE já foi encerrado, as rotinas de geração das estruturas e as de detalhamento tiveram que adaptar-se aos requisitos do AutoMETAL.

A primeira parte da integração CAD CAE é a responsável por exportar a geometria gerada do AutoCAD para o ambiente CAE. O processo é feito através de um arquivo de extensão *.dxf*, que é gerado automaticamente no AutoCAD e interpretado pelo AutoMETAL. O AutoMETAL tem a capacidade de interpretar determinados arquivos de extensão *.dxf*, desde que eles atendam alguns requisitos. Dessa forma, as rotinas de geração de treliças de duas águas, banzos paralelos e arcos circulares tiveram que adaptar-se a esses requisitos, para que a integração fosse completa. Nesse trabalho não é necessária a explicação de cada requisito do AutoMETAL; basta afirmar que eles foram atendidos com sucesso, e que o AutoMETAL consegue *reconhecer* os dados da estrutura gerados no ambiente CAD.

O exemplo numérico a seguir ilustra a importação dos dados gerados no ambiente CAD para o CAE, para a rotina de treliças de arcos circulares. Os dados de entrada da treliça são:

- Vão livre: 20,0 metros;
- Ângulo de Arranque: 90,0°;
- Relação Flecha / Vão (f/L): 0,12455;
- Distância entre Banzos: 0,5090 metro;
- Máxima Distância entre Terças: 1,4 metros;
- Altura dos Pilares: 5,0 metros;
- Comprimento Total da Estrutura: 40,0 metros;
- Distância entre Trelças: 5,0 metros;
- O Fechamento Frontal é feito em Alvenaria; o outro, em Estrutura Metálica.

As Figuras 4.1 a 4.7 ilustram o processo de geração da trelça a partir dos dados de entrada, e sua exportação para o programa CAE. No AutoMETAL 1.01 - V&M do Brasil - UNICAMP, é feita a importação da geometria, a análise estrutural e o dimensionamento das barras, que pode ser ilustrado na Fig. 4.6.

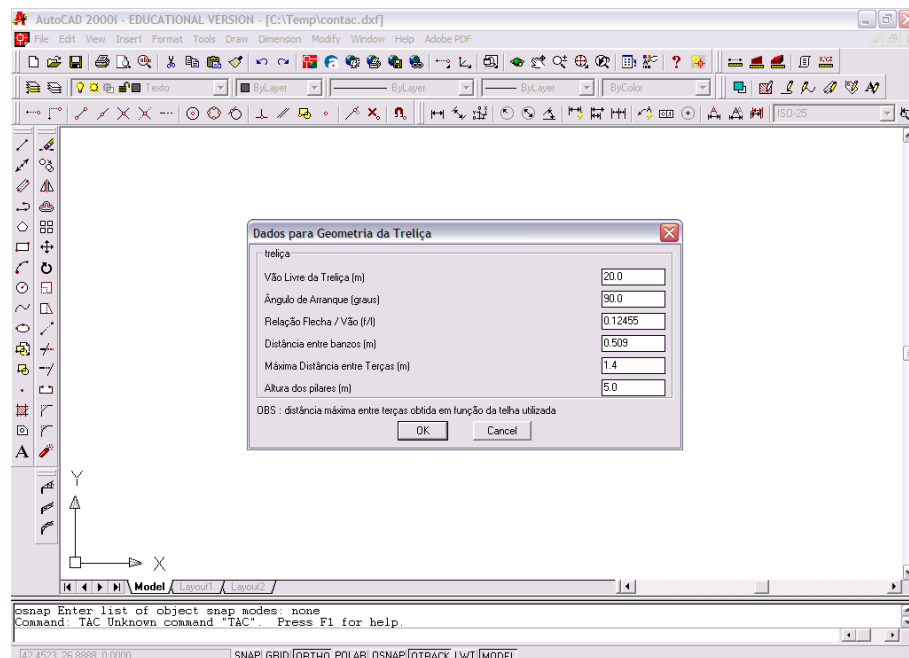


Figura 4.1: Inserção dos dados de entrada, no AutoCAD.

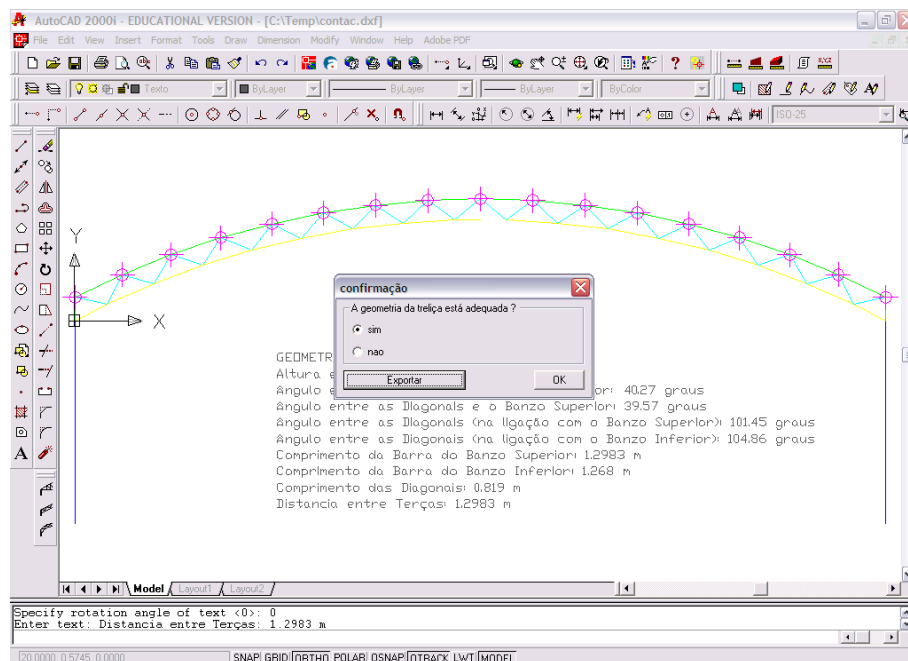


Figura 4.2: Geração da geometria da treliça , no AutoCAD.

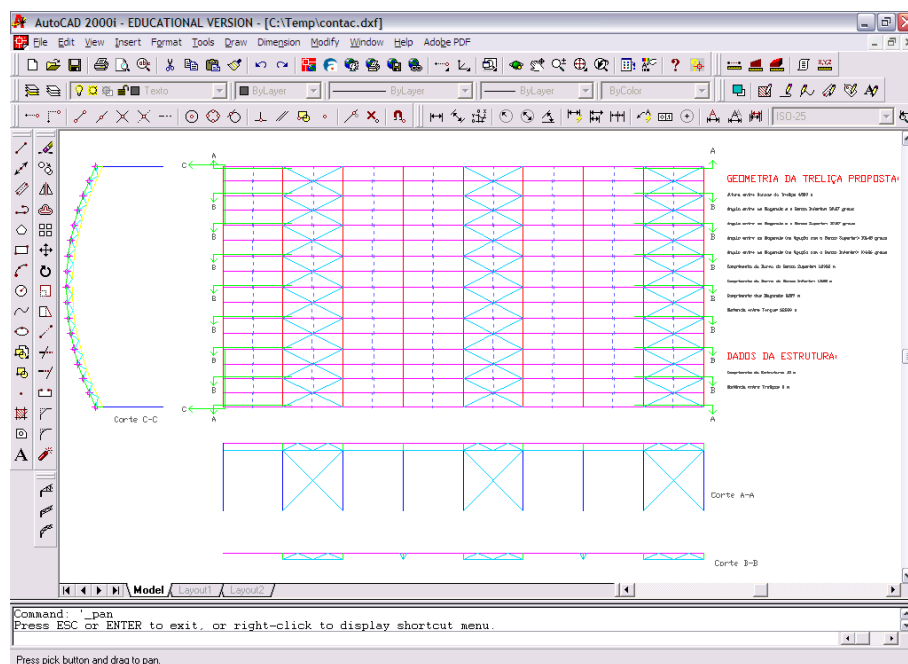


Figura 4.3: Geração do projeto básico, no AutoCAD.

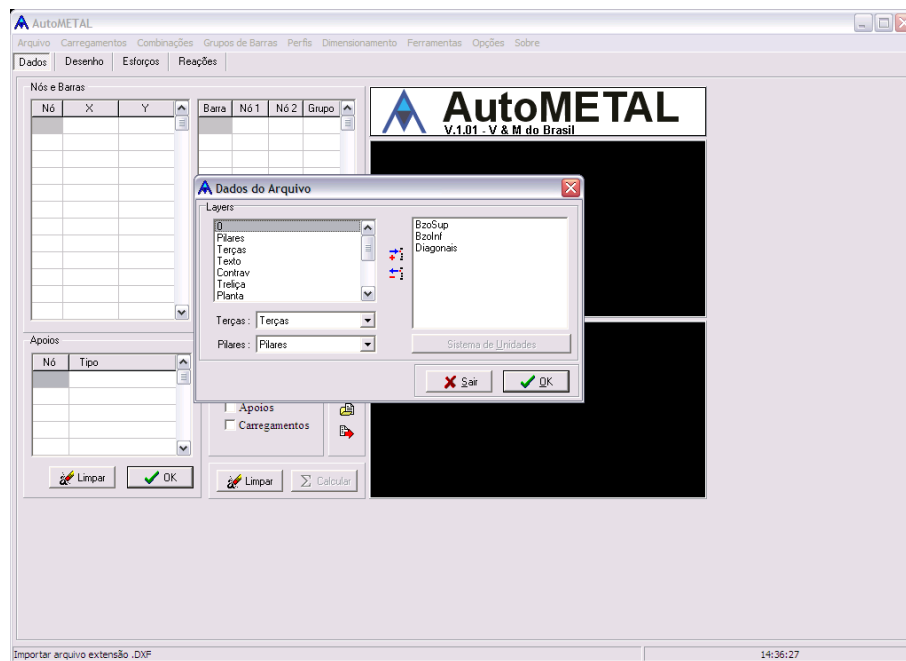


Figura 4.4: Importação da Trelça, no AutoMETAL.

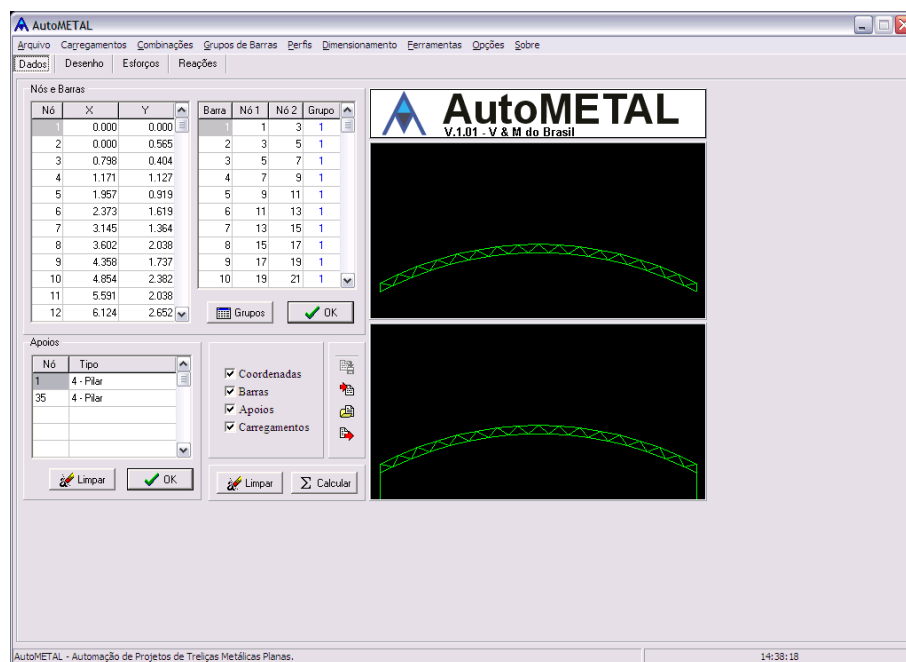


Figura 4.5: Tela do AutoMETAL, ilustrando a trelça importada.

das ligações típicas. A importação dos dados feita no ambiente CAD se dá através de arquivos texto que são gerados automaticamente no CAE. Essa foi a única modificação realizada no programa AutoMETAL 1.01 V&M do Brasil - UNICAMP: foi desenvolvida uma classe no programa AutoMETAL para que este possa exportar o arquivo de texto no padrão estabelecido para a importação pelo AutoCAD. As informações fornecidas pelo AutoMETAL compreendem os dados dos perfis utilizados (diâmetro e espessura do banzo, diagonais e, havendo necessidade, do montante intermediário) e os dados da geometria da ligação (gap, excentricidade e os ângulos formados entre as diagonais e o banzo). Esses dados são interpretados pelas rotinas desenvolvidas na linguagem AutoLISP que, a partir delas, realizará o detalhamento automático da respectiva ligação.

As Figuras 4.8 a 4.11 a seguir ilustram o processo de exportação dos dados do ambiente CAE para o CAD. Em seguida, o programa dá continuidade e realiza o detalhamento da ligação exportada. Neste exemplo será verificada uma ligação do tipo “K”, cuja geometria e esforços são observados na Fig. 4.8. Após a verificação (Fig. 4.9), o usuário exportou a ligação de volta ao ambiente CAD, ilustrado pelas Figuras 4.10 e 4.11. Finalmente, tem-se o resultado final observado pela Fig. 4.12, onde observa-se o detalhamento da ligação verificada. O procedimento de como foi realizado o detalhamento será abordado no próximo capítulo.

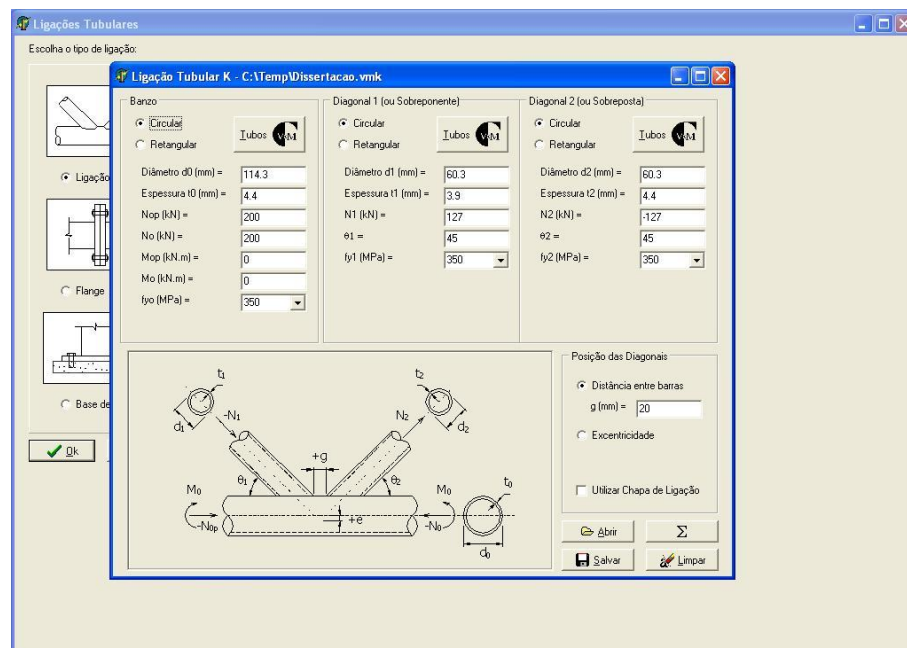


Figura 4.8: Geometria e esforços para a ligação tipo “K”.

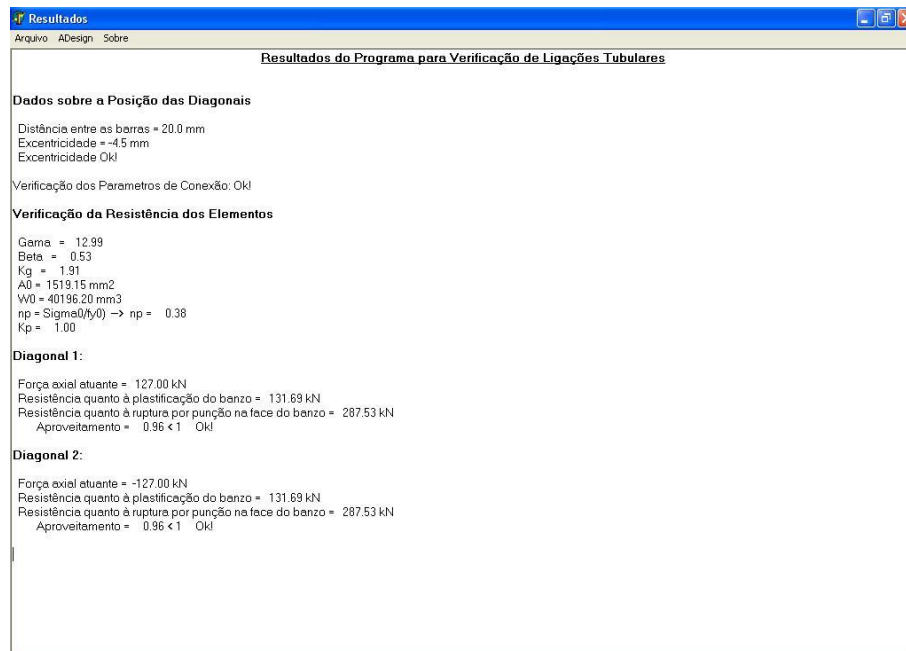


Figura 4.9: Verificação da ligação “K”.

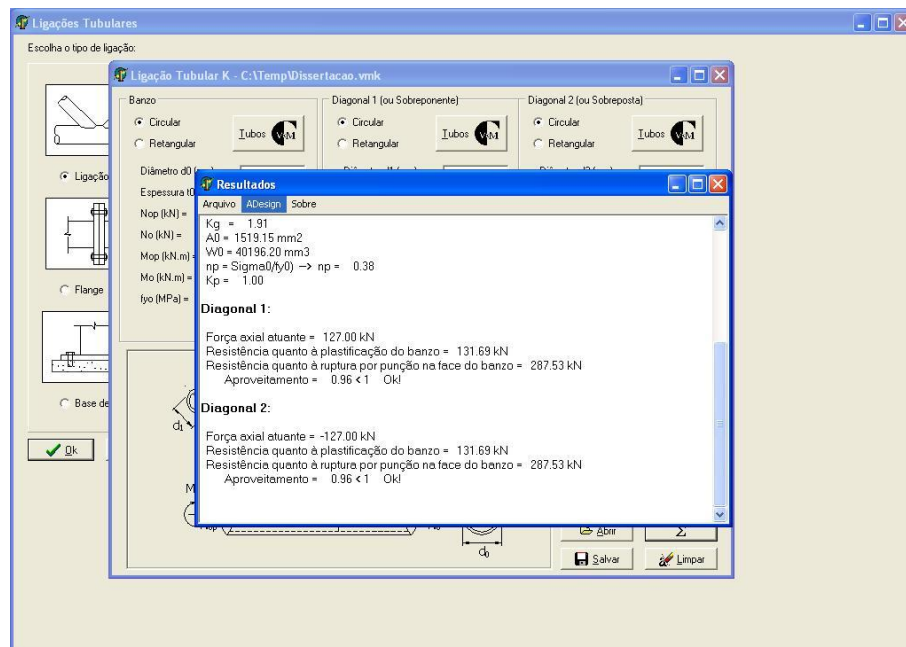


Figura 4.10: Exportação para o ambiente CAD.

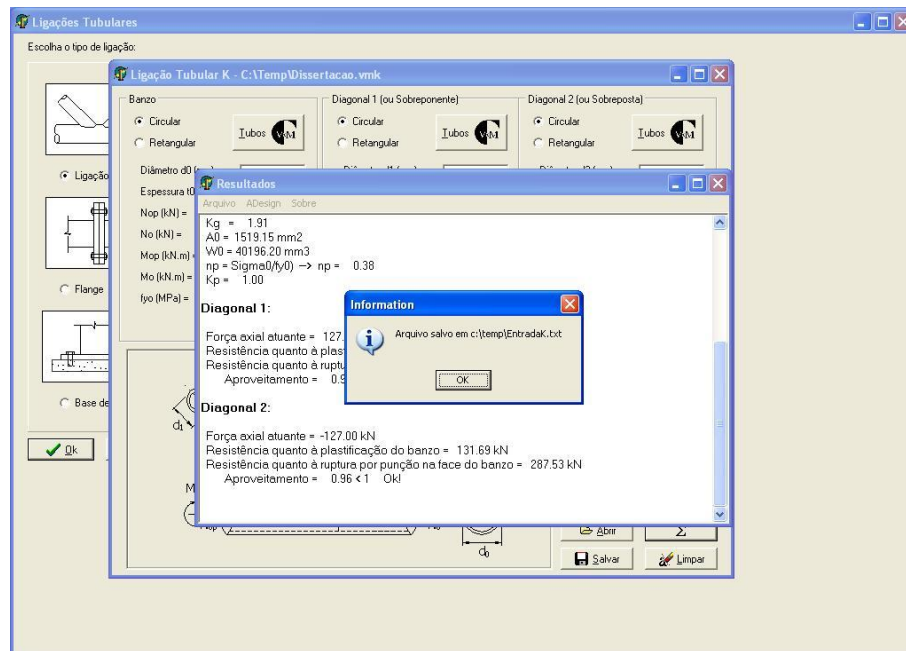


Figura 4.11: Arquivo de exportação gerado com sucesso.

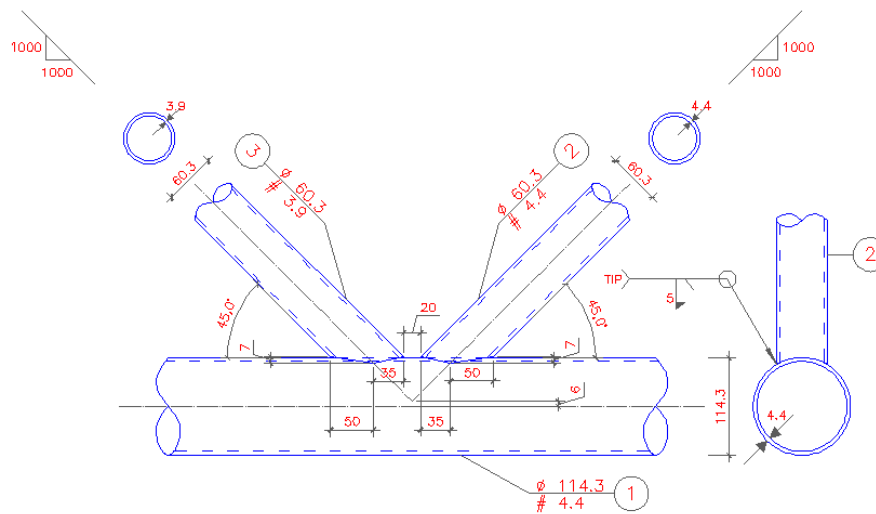


Figura 4.12: Resultado final do detalhamento.

Capítulo 5

Desenvolvimento das Rotinas de Detalhamento das Ligações Típicas

5.1 Considerações Gerais


Este capítulo tem o objetivo de realizar a explicação dos algoritmos básicos que foram desenvolvidos com o objetivo de automatizar o projeto estrutural das coberturas em estudo, usando-se dos fundamentos teóricos apresentados anteriormente. Será abordado neste capítulo como se dá a manipulação dos dados da estrutura dentro do software AutoCAD para que seja realizado o detalhamento automático das ligações típicas.

Ao todo, foram desenvolvidas neste trabalho duas rotinas de detalhamento. A primeira delas, denominada *LigK*, é a responsável por realizar o detalhamento de ligações do tipo “K”, ou seja, quando uma barra do banzo une-se com duas barras de diagonais. A segunda rotina, denominada *LigTK*, realiza o detalhamento da ligação tipo “TK”, que é semelhante a anterior, com a inserção de uma barra perpendicular ao banzo, ou seja, o montante, entre as barras das diagonais. Ambas as rotinas utilizam apenas barras de perfis tubulares circulares do catálogo da V&M do Brasil como banco de dados.

As duas rotinas podem trabalhar de duas formas: a primeira delas, importando os dados de entrada do ambiente CAE, que informará os perfis das barras e a geometria da ligação, e a segunda, introduzindo os dados de entrada pelo usuário. Essa segunda forma

permite que as duas rotinas sejam independentes, ou seja, elas são capazes de realizar o detalhamento automático de ligações típicas através dos dados de entrada do usuário.

5.2 Rotina de Ligação K

A rotina de ligações do tipo “K”, que corresponde ao arquivo *LigK.lsp*, é a responsável por realizar o detalhamento de uma ligação formada por um banzo e duas diagonais. A rotina avalia os dados de entrada do usuário e, com eles, realiza o detalhamento automaticamente. Além disso, a rotina utiliza caixas de diálogo que explicam claramente os dados necessários para que o detalhamento seja realizado com sucesso. Para iniciar o programa, é necessário ao usuário clicar no ícone referente à rotina de ligações “K”, , ou digitar na tela de textos do AutoCAD o comando LIGK (LIGação K). Com isso, o AutoCAD abrirá automaticamente uma caixa de diálogos como a da Fig. 5.1, pedindo ao usuário os seguintes dados de entrada:

- Perfil da barra do banzo;
- Perfil da barra da primeira diagonal;
- Perfil da barra da segunda diagonal;
- Inclinação da primeira diagonal, em graus;
- Inclinação da segunda diagonal, em graus;
- Valor do *gap* ou da excentricidade;
- Altura da solda da ligação.

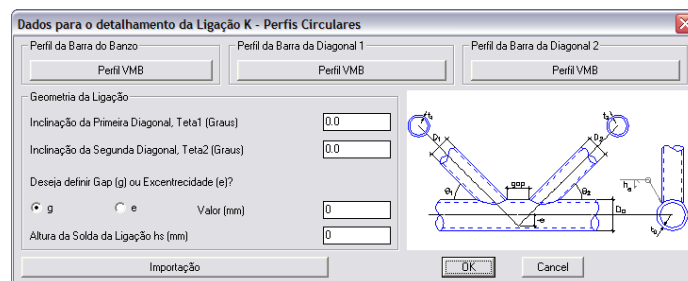


Figura 5.1: Caixa de Diálogo do AutoCAD, solicitando os dados de entrada da rotina.

Em seguida, o programa irá analisar os dados de entrada, e caso sejam aprovados, a rotina realiza o detalhamento automático da ligação.

Pode-se perceber claramente na Fig. 5.1 a presença do botão denominado *Importação*. Caso esse botão seja selecionado, o programa dá continuidade lendo os dados diretamente do arquivo texto criado automaticamente no ambiente CAE. A descrição da transferência dos arquivos do ambiente CAE de volta ao CAD já foi abordada em 4.

5.2.1 Análise dos Dados de Entrada

O programa realiza diversas análises para validar os dados de entrada. A primeira delas é a verificação da inclinação das diagonais: conforme proposto em 2.2.1.1, os ângulos das ligações devem pertencer ao intervalo de 20° a 60° .

Outra verificação que o programa realiza é a comparação dos perfis do banzo com os das diagonais: como as diagonais serão unidas pelo perfil do banzo, seus diâmetros não podem ser maiores que o diâmetro do perfil do banzo. O programa alerta o usuário automaticamente caso ele informe dados de entrada incoerentes.

O programa também não permite que o usuário utilize uma altura de solda superior às espessuras dos perfis utilizados na ligação. O motivo desse impedimento se deve ao fato de que a solda iria danificar os perfis da ligação caso sua altura seja maior que alguma das espessuras dos perfis, conforme o *Structural Welding Code AWS D1.1-82* [4], da *American Welding Society*, que dá as recomendações dos processos de soldagem e as técnicas de execução de estruturas soldadas.

Após serem feitas as análises dos dados de entrada, o programa dá continuidade e irá automaticamente realizar o detalhamento da ligação “K”, indicando as dimensões dos perfis, a geometria da ligação proposta e as indicações das soldas.

5.2.2 Geração do Detalhamento da Ligação Tipo “K”

O primeiro passo da rotina é criar as *layers* necessárias no detalhamento da ligação. Ao todo são criadas 8 *layers*, uma para cada parte da ligação: banzo inferior, diagonal esquerda, diagonal direita e suas respectivas espessuras, uma *layer* para as cotas e outra para os eixos dos perfis.

Em seguida, o programa adota uma variável, denominada ORIGEM, de coordenada (0,0), que será utilizada como referência ao longo do processo de detalhamento. Em seguida, o programa determina os pontos de extremidade do banzo, em função dos dados de entrada do usuário. O comprimento do banzo foi adotado como sendo cinco vezes maior que seu diâmetro, fazendo com que o resultado final do detalhe torne-se sempre agradável para qualquer diâmetro adotado. Em seguida, o programa realiza a indicação do corte do banzo, realizado pelo comando *spline* do AutoCAD, que permite uma representação de corte extremamente profissional. Finalmente, o programa realiza a representação da espessura do perfil no corte, em sua respectiva *layer*. A Fig. 5.2 ilustra o resultado da representação gráfica do banzo.

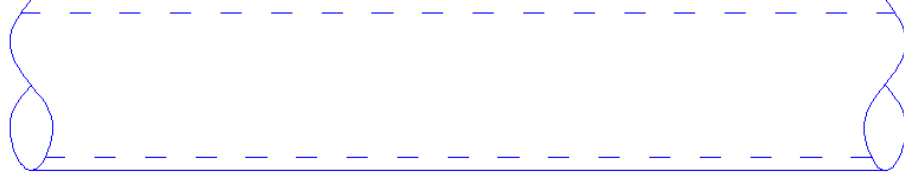


Figura 5.2: Representação gráfica do banzo.

Em seguida, o programa calcula o valor da excentricidade ou do gap da ligação, dependendo de qual dado foi fornecido inicialmente pelo usuário. A formulação [32] para a determinação dessas variáveis é realizada através das Eq. 5.1 e 5.2 a seguir. Pode-se observar que gap e excentricidade são variáveis dependentes uma da outra, conforme discutido em ???. A nomenclatura das equações segue o apresentado em 2.5.3.

$$gap = \frac{e + \frac{d_0}{2}}{\frac{\sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}} - \left(\frac{d_1}{2 \cdot \sin \theta_1} + \frac{d_2}{2 \cdot \sin \theta_2} \right) \quad (5.1)$$

$$e = \frac{\sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \cdot \left(\frac{d_1}{2 \cdot \sin \theta_1} + \frac{d_2}{2 \cdot \sin \theta_2} + gap \right) - \frac{d_0}{2} \quad (5.2)$$

Caso o usuário tenha fornecido o valor da excentricidade, o programa calcula o valor do gap resultante e realiza uma verificação. Caso o gap resultante seja negativo ou menor que o espaçamento mínimo necessário para a futura utilização da solda, o programa alerta o usuário através de uma mensagem, avisando-o para alterar os dados de entrada, seja aumentando o valor da excentricidade ou diminuindo o valor dos ângulos θ_1 e θ_2 . Logo, o programa não permite a ocorrência de *overlaps* nas ligações, conforme 2.5.2.

Em seguida, o programa calcula o ponto central do banzo, que é função do diâmetro do banzo fornecido. A partir desse ponto, o programa aplica o valor da excentricidade fornecida ou calculada em 5.2, e encontra o ponto de encontro dos eixos das diagonais, também chamado de *ponto de trabalho*. A coordenada cartesiana desse ponto é provavelmente a mais importante da representação gráfica da ligação, já que a partir dela serão lançadas as barras das diagonais, em função da inclinação retirada dos dados de entrada.

Com o ponto de trabalho encontrado e armazenado na variável PT, o programa traça as linhas de eixos das diagonais, em sua respectiva *layer*. E da mesma forma que o banzo, o programa lança os dados referentes às diagonais, ou seja, seu diâmetro e sua espessura, e realiza sua representação gráfica. Finalmente, com o comando *spline* do AutoCAD, é realizado o corte das diagonais, como pode-se observar na Fig. 5.3.

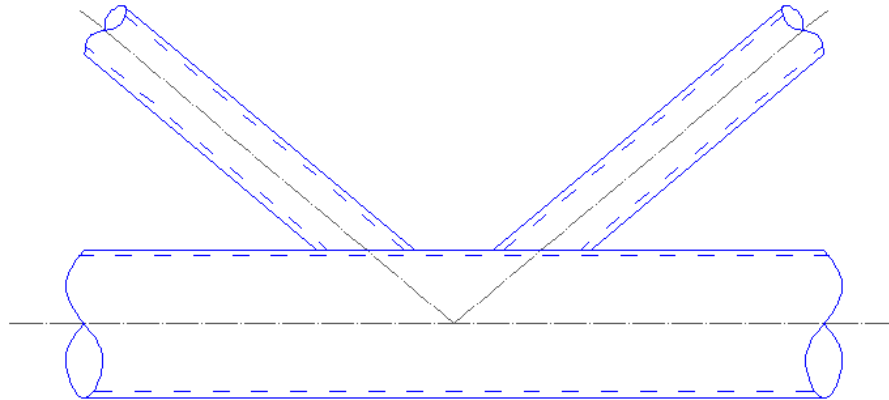


Figura 5.3: Geração das diagonais na ligação.

Em seguida, o programa encontra as coordenadas dos pontos de encontro das duas diagonais com o banzo. Essas coordenadas serão importantes na sequência do andamento da rotina, quando será representado o corte nas barras das diagonais. O procedimento para a determinação das coordenadas exatas destes pontos é facilitado pelo comando denomi-

nado *inters* da linguagem AutoLISP, que é capaz de armazenar em uma variável o ponto de intersecção de duas retas.

Para o corte nas barras que formam a ligação, foram adotadas as recomendações fornecidas nos manuais internacionais do CIDECT [32]. Essas recomendações reconhecidas internacionalmente exibem instruções de corte que além de garantir a integridade da ligação são economicamente viáveis, já que são feitos apenas dois cortes em cada diagonal. A Fig. 5.4 a seguir ilustra essas recomendações que foram implementadas no programa computacional desenvolvido neste trabalho.

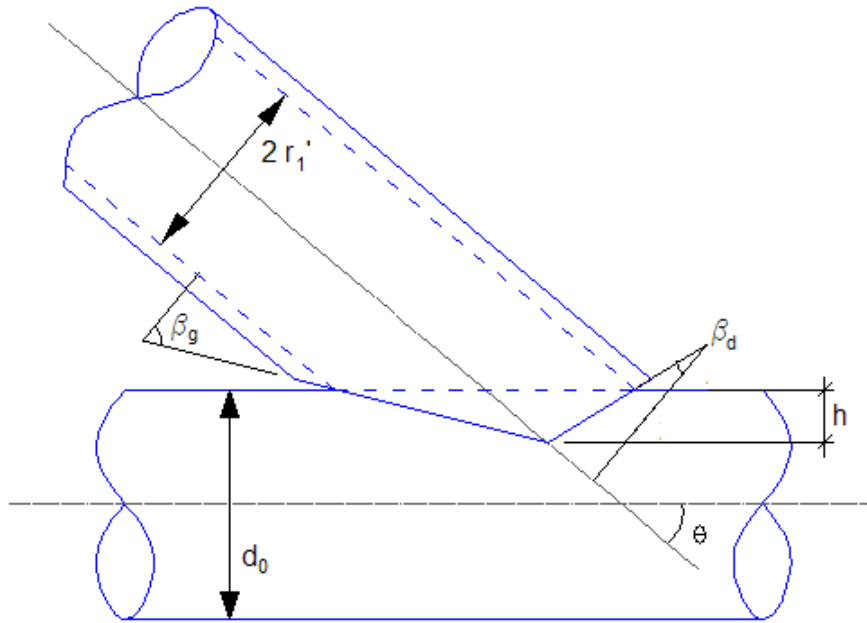


Figura 5.4: Recomendação de corte.

A formulação a seguir mostra a determinação das dimensões ilustradas em 5.4.

$$h = \frac{d_0}{2} - \sqrt{\frac{d_0^2}{4} - r_1'^2}$$

$$\alpha_g = \arctan\left(\frac{h \cdot \sin \theta}{r_1' + h \cdot \cos \theta}\right)$$

$$\alpha_d = \arctan\left(\frac{h \cdot \sin \theta}{r'_1 - h \cdot \cos \theta}\right)$$

$$\beta_g = 90^\circ - \theta + \alpha_g$$

$$\beta_d = -90^\circ + \theta + \alpha_d$$

Em seguida, o programa finaliza o detalhamento da ligação, representando as cotas relevantes para fabricação e montagem, a solda e sua respectiva altura (que foram fornecidas inicialmente pelo usuário ou importadas do ambiente CAE), e finalmente, a indicação de cada perfil utilizado na ligação, com seu diâmetro e espessura. Além disso, o programa nomeia automaticamente os perfis utilizados na ligação, facilitando a futura montagem. Finalmente, o programa ilustra os ângulos das diagonais da ligação que serão necessários para a fabricação da ligação. A Fig. 5.5 a seguir ilustra o resultado final da rotina de ligações do tipo “K”, para uma ligação formada por um banzo inferior de perfil de diâmetro 114,3 mm e espessura 4,4 mm; a primeira diagonal possui 60,3 mm de diâmetro e 3,9 mm de espessura; a segunda diagonal possui 60,3 mm de diâmetro e 4,4 mm de espessura; as inclinações das diagonais são idênticas, e valem 45°; foi fornecido o gap, de 20 mm, e a altura da solda vale 5 milímetros. Observa-se na Fig. 5.5 que cada perfil foi nomeado pelo índice 1, 2 e 3, já que eles são diferentes uns dos outros; neste mesmo exemplo, caso a espessura das diagonais fosse a mesma, ambos os perfis seriam chamados pelo índice 2, enquanto que o banzo continuaria a ter o índice 1.

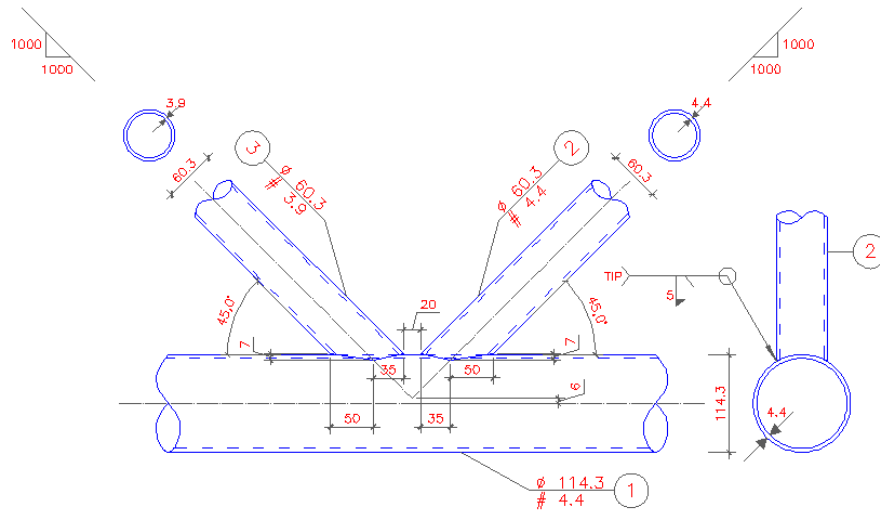



Figura 5.5: Resultado final da rotina de detalhamento de ligações do tipo “K”.

O objetivo do resultado final da rotina de detalhamento foi representar a ligação desejada da forma mais clara possível, facilitando a sua futura execução. Como o programa gera a ligação em poucos segundos, é possível para o engenheiro realizar todas as ligações de uma treliça de uma forma bastante eficiente e com qualidade.

5.3 Rotina de Ligação TK

A rotina de ligações do tipo “TK”, que corresponde ao arquivo *LigTK.lsp*, é a responsável por realizar o detalhamento de uma ligação formada por um banzo, um montante e duas diagonais. A rotina avalia os dados de entrada do usuário e, com eles, realiza o detalhamento automaticamente. Além disso, a rotina utiliza caixas de diálogo que explicam claramente os dados necessários para que o detalhamento seja realizado com sucesso. Para iniciar o programa, é necessário ao usuário clicar no ícone referente à rotina de ligações “TK”, , ou digitar na tela de textos do AutoCAD o comando LIGTK (LIGAção TK). Com isso, o AutoCAD abrirá automaticamente uma caixa de diálogos como a da Fig. 5.6, pedindo ao usuário os seguintes dados de entrada:

- Perfil da barra do banzo;
- Perfil da barra da primeira diagonal;

- Perfil da barra da segunda diagonal;
- Perfil da barra do montante;
- Inclinação da primeira diagonal, em graus;
- Inclinação da segunda diagonal, em graus;
- Valor do *gap* ou da excentricidade da primeira diagonal;
- Valor do *gap* ou da excentricidade da segunda diagonal;
- Altura da solda da ligação.

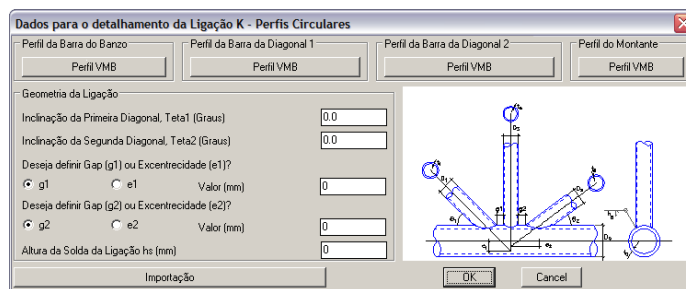


Figura 5.6: Caixa de Diálogo do AutoCAD, solicitando os dados de entrada da rotina.

Em seguida, o programa irá analisar os dados de entrada, e caso sejam aprovados, a rotina realiza o detalhamento automático da ligação.

Pode-se perceber claramente na Fig. 5.6 a presença do botão denominado *Importação*. Caso esse botão seja selecionado, o programa dá continuidade lendo os dados diretamente do arquivo texto criado automaticamente no ambiente CAE. A descrição da transferência dos arquivos do ambiente CAE de volta ao CAD já foi abordada em 4.

5.3.1 Análise dos Dados de Entrada

O programa realiza diversas análises para validar os dados de entrada. A primeira delas é a verificação da inclinação das diagonais: conforme proposto em 2.2.1.1, os ângulos das ligações devem pertencer ao intervalo de 20° a 60°.

Outra verificação que o programa realiza é a comparação dos perfis do banzo com os das diagonais: como as diagonais serão unidas pelo perfil do banzo, seus diâmetros não podem ser maiores que o diâmetro do perfil do banzo. O programa alerta o usuário automaticamente caso ele informe dados de entrada incoerentes.

O programa também não permite que o usuário utilize uma altura de solda superior às espessuras dos perfis utilizados na ligação. O motivo desse impedimento se deve ao fato de que a solda iria corromper os perfis da ligação caso sua altura seja maior que alguma das espessuras dos perfis, conforme o *Structural Welding Code AWS D1.1-82* [4], da *American Welding Society*, que dá as recomendações dos processos de soldagem e as técnicas de execução de estruturas soldadas.

Após serem feitas as análises dos dados de entrada, o programa dá continuidade e irá automaticamente realizar o detalhamento da ligação “TK”, indicando as dimensões dos perfis, a geometria da ligação proposta e as indicações das soldas.

5.3.2 Geração do Detalhamento da Ligação Tipo “TK”

O primeiro passo da rotina é criar as *layers* necessárias no detalhamento da ligação. Ao todo são criadas 10 *layers*, uma para cada parte da ligação: banzo inferior, diagonal esquerda, diagonal direita, montante e suas respectivas espessuras, uma *layer* para as cotas e outra para os eixos dos perfis.

Em seguida, o programa adota uma variável, denominada ORIGEM, de coordenada (0,0), que será utilizada como referência ao longo do processo de detalhamento. Em seguida, o programa determina os pontos de extremidade do banzo, em função dos dados de entrada do usuário. O comprimento do banzo foi adotado como sendo cinco vezes maior que seu diâmetro, fazendo com que o resultado final do detalhe torne-se sempre agradável para qualquer diâmetro adotado. Em seguida, o programa realiza a indicação do corte do banzo, realizado pelo comando *spline* do AutoCAD, que permite uma representação de corte extremamente profissional. Finalmente, o programa realiza a representação da espessura do perfil no corte, em sua respectiva *layer*. A Fig. 5.7 ilustra o resultado da representação gráfica do banzo.

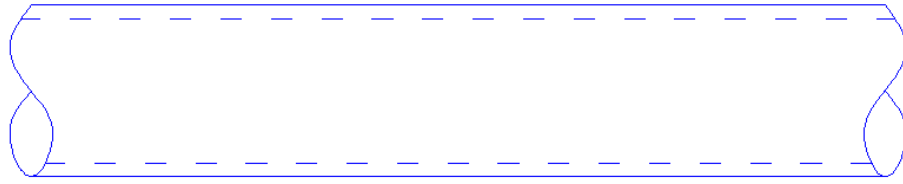


Figura 5.7: Representação gráfica do banzo.

Em seguida, o programa calcula o ponto central do banzo, que é função do diâmetro do banzo fornecido. A partir dele, o programa realiza a representação gráfica do montante na ligação. Com o ponto central encontrado e armazenado na variável PC, o programa traça as linhas de eixos do montante, em sua respectiva *layer*. E da mesma forma que o banzo, o programa lança os dados referentes ao montante, ou seja, seu diâmetro e sua espessura, e realiza sua representação gráfica. Finalmente, com o comando *spline* do AutoCAD, é realizado o corte.

Em seguida, o programa calcula o valor das coordenadas dos pontos de encontro do montante com o banzo inferior, em função dos dados de entrada. A partir desse ponto, o programa irá verificar se cada uma das diagonais poderá ser posicionada na ligação sem que haja *overlap*. A formulação adotada para essa determinação é a mesma das equações 5.1 e 5.2 já apresentadas, com a diferença de que deve ser feita uma verificação para cada diagonal. Caso o programa detecte a impossibilidade de realizar a ligação sem que haja a sobreposição de barras, ele automaticamente alerta o usuário, pedindo novos dados de entrada.

A partir desse ponto, o programa aplica o valor da excentricidade fornecida ou calculada e encontra o ponto de encontro dos eixos das diagonais, também chamado de *ponto de trabalho*. Com esse ponto encontrado e armazenado na variável PT, o programa traça as linhas de eixos das diagonais, em sua respectiva *layer*. E da mesma forma que o banzo, o programa lança os dados referentes às diagonais, ou seja, seu diâmetro e sua espessura, e realiza sua representação gráfica. Finalmente, com o comando *spline* do AutoCAD, é realizado o corte das diagonais, como pode-se observar na Fig. 5.8.

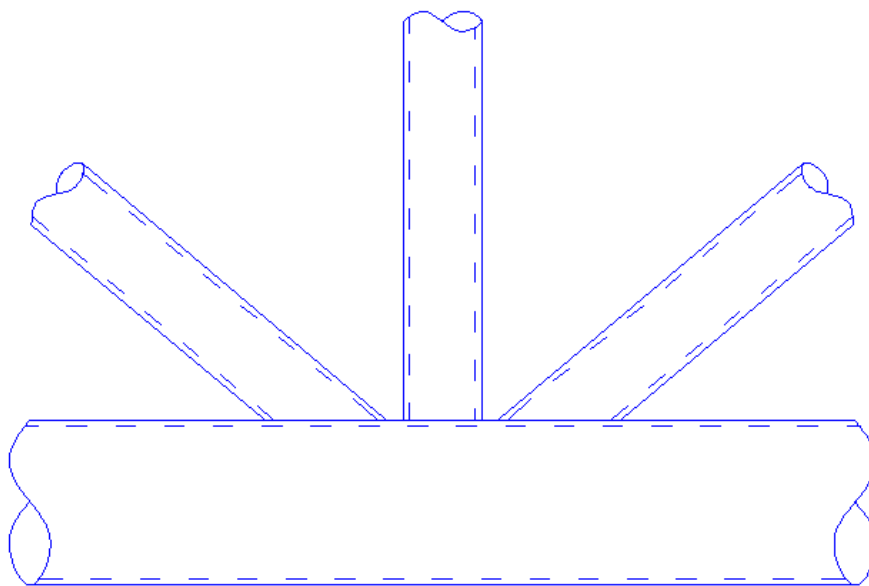


Figura 5.8: Geração das diagonais na ligação.

Em seguida, o programa irá realizar o corte em cada uma das diagonais e no montante da ligação. Torna-se desnecessária a explicação de como esse corte é realizado, já que a formulação e o método de encontro dos pontos necessários é realizada da mesma maneira que na rotina do tipo “K” apresentada em 5.2.2.

Em seguida, o programa finaliza o detalhamento da ligação, representando as cotas, a indicação de cada perfil utilizado e os ângulos da ligação exatamente como em 5.2.2. A Fig. 5.9 a seguir ilustra o resultado final da rotina de ligações do tipo “TK”, para uma ligação formada por um banzo inferior de perfil de diâmetro 101,6 mm e espessura 4,0 mm; as diagonais e o montante têm a mesma dimensão, 48,3 mm de diâmetro e 3,7 mm de espessura; as inclinações das diagonais são idênticas, e valem 40° ; foram fornecidos os gaps direito e esquerdo, ambos com 11 mm, e a altura da solda vale 4 milímetros.

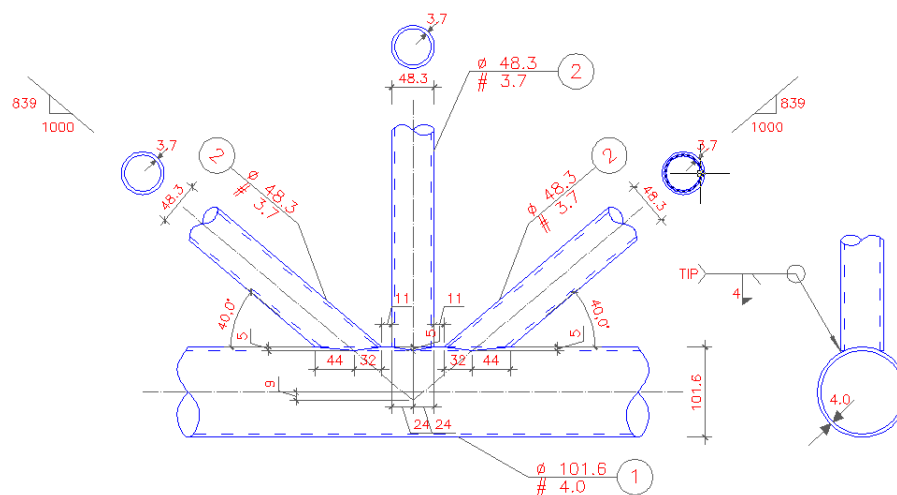


Figura 5.9: Resultado final da rotina de detalhamento de ligações do tipo “KT”.

O objetivo do resultado final da rotina de detalhamento foi representar a ligação desejada da forma mais clara possível, facilitando a sua futura execução. Como o programa gera a ligação em poucos segundos, é possível para o engenheiro realizar todas as ligações de uma treliça de uma forma bastante eficiente e com qualidade.

Capítulo 6

Considerações Finais

Uma das maiores contribuições deste trabalho foi mostrar as vantagens proporcionadas pelo uso correto dos perfis tubulares nas estruturas de coberturas metálicas formadas por treliças planas, já que as propriedades físicas e geométricas destes perfis garantem na maioria das vezes uma redução do peso total das estruturas analisadas, garantindo a economia nessas edificações. Outra contribuição foi também poder contribuir com a disseminação desses perfis no mercado nacional através do programa computacional desenvolvido nesse trabalho. Como foi ilustrado anteriormente, o programa computacional é de fácil aplicação e é uma ferramenta poderosa na elaboração de projetos econômicos e seguros.

No entanto, muitas pesquisas podem ainda ser realizadas para mostrar outras vantagens do uso dos perfis tubulares. Seguindo a linha deste trabalho, uma linha de pesquisa seria a adição de outras treliças planas que não foram implementadas no programa computacional, como por exemplo treliças de arcos parabólicos ou os arcos de inércia variável.

Outros trabalhos que podem seguir a linha de pesquisa apresentada aqui é a exploração da geração de coberturas no AutoCAD em três dimensões, ou seja, a geração automática das edificações analisadas neste trabalho no espaço. O impacto de um programa computacional desse porte seria muito grande, assim como o tempo e dedicação para seu desenvolvimento.

Outras pesquisas que podem ser desenvolvidas com o intuito de explorar as vantagens das estruturas tubulares é o estudo das suas ligações. De uma forma geral, as ligações podem

ser consideradas os pontos mais críticos das estruturas tubulares quando comparadas com outros perfis. Em perfis de chapas dobradas, laminados a frio ou em perfis soldados, existe uma literatura muito grande no estudo das ligações, fato que não ocorre nos perfis tubulares. Portanto, o estudo das ligações fará com que o seu custo seja reduzido ainda mais.

Portanto, as sugestões para a continuação deste trabalho são a implementação ao programa computacional de outras ligações presentes nas treliças abordadas neste trabalho, a exploração de outros arranjos de treliças planas, como treliças de arcos parabólicos e arcos de inércia variável, e a geração automática das coberturas no espaço, aproveitando os fantásticos recursos que o ambiente CAD fornece.

Referências Bibliográficas

- [1] ABNT, Rio de Janeiro. *ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 8800: Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios*, 1986.
- [2] ABNT, Rio de Janeiro. *ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6123: Forças Devido ao Vento em Edificações*, 1987.
- [3] ABNT, Rio de Janeiro. *ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 14762: Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio - Procedimento*, 2001.
- [4] American Welding Society, EUA. *A.W.S.: Structural Welding Code - Steel. ANSI/AWS D1.1-2000*, 2000.
- [5] ARAÚJO, A. H. M.; REQUENA, J. A. V.; MINCHILLO, D. G. V. e THOMAZ, S. A. M. Projeto, Fabricação e Montagem de Estruturas Metálicas Tubulares com Seção Circular. *Revista Construção Metálica*, vol.53, p.29–35, 2002. ABCEM.
- [6] AutoDesk, EUA. *AutoCAD: Reference Manual*, 1993.
- [7] AutoDesk, EUA. *AutoLISP Programmer's Reference*, 1993.
- [8] BEER, S. C. e REQUENA, J. A. V. *Automação do Projeto de Estrutura Metálica para Edificação com Cobertura em Arco*. Relatório de Iniciação Científica, FEC - UNICAMP - FAPESP, Campinas, SP, 1999.
- [9] BERTOLINO JUNIOR, R. *Sistema Integrado para Análise, Dimensionamento, Detalhamento e Desenho de Estruturas de Aço*. Tese para obtenção do Título de Livre Docência, Universidade Estadual de São Paulo - UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, 1998. 60f.
- [10] BRANCO, R. H. F.; REQUENA, J. A. V. e SOUZA, M. G. Q. Automação do Projeto de Estruturas Metálicas Planas Utilizando Perfis Tubulares. Publicado em *XXI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, Mendoza, Argentina, Maio 2004.

- [11] BRANCO, R. H. F.; SANTOS, R. M.; REQUENA, J. A. V. e ARAÚJO, A. H. M. Automação do Projeto de Pórticos Metálicos Constituídos de Barras Tubulares. Publicado em *Congresso Internacional da Construção Metálica - II CICOM*, São Paulo, SP, 2002.
- [12] BRANCO, R. H. F.; TARDIN, A. S. e REQUENA, J. A. V. Automação do Dimensionamento de Elementos Estruturais Constituídos de Perfis Laminados de Aço de acordo com as Normas NBR 8800/86, LRFD/94 e EUROCODE 3/93. Publicado em *Congresso Ibero Latino-Americano de Métodos Computacionais para Engenharia 2001 - XXII CILAMCE*, Campinas, SP, Novembro 2001.
- [13] CALLEJAS, I. J. A. e REQUENA, J. A. V. Análise e Dimensionamento de Treliças Metálicas Planas Considerando os Efeitos de Não Linearidade Geométrica e Física. Publicado em *XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, Punta Del Este, Uruguai, Novembro 2000.
- [14] DIAS, L. A. M. *Estruturas de Aço: Conceitos, Técnicas e Linguagem*. Zigurate, São Paulo, 2002. 4. ed. 192p.
- [15] FORTI, T. L.; BRANCO, R. H. F. e REQUENA, J. A. V. Automação da Geometria das Ações Estáticas e Dinâmicas Devidas ao Vento em Torres Metálicas. *Revista Construção Metálica*, vol.58, p.26–32, 2003. ABCEM.
- [16] GAÁL, J. A. *Curso de AutoLISP*. DeseCAD Computação Gráfica Ltda, Campinas, 1997.
- [17] GRINTER, L. E. *Design of Modern Steel Structures*. The MacMillan Company, Nova Iorque, 1941.
- [18] Instituto Brasileiro de Siderurgia - IBS, Centro Brasileiro da Construção em Aço - CBCA, Rio de Janeiro. *Ligações em Estruturas Metálicas*, 2004.
- [19] McCORMAC, J. C. *Structural Steel Design*. Harper & Row, Nova Iorque, 1981.
- [20] PACKER, J. A. e HENDERSON, J. E. *Hollow Structural Section Connections and Trusses: A Design Guide*. Canadian Institute of Steel Construction, Toronto, 1997. 2. ed.
- [21] REQUENA, J. A. V. *Estrutura Metálica para Telhado de Duas Águas e Lanternim: Exemplo Numérico com Base nas Normas NBR 8681/84 - NBR 6123/86 - CSA S136 M84 - AISI/84*. Apostila da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Univ. Estadual de Campinas - UNICAMP, Cód. P-GR-905-400, Campinas, SP, Agosto 1989.

- [22] REQUENA, J. A. V.; BEER, S. C. e CALLEJAS, I. J. A. Automação e Dimensionamento de Estrutura Metálica para Arcos Circulares Treliçados. Publicado em *Congresso Ibero Latino-Americano de Métodos Computacionais para Engenharia - XXI CILAMCE*, Rio de Janeiro, RJ, Dezembro 2000.
- [23] REQUENA, J. A. V.; BRANCO, R. H. F. e ODAN, A. M. Automação das Ações Devidas ao Vento em Edificações Parte 2: Telhados em Arco e Tipo Shed. *Revista Construção Metálica*, vol.46, p.37–43, 2001. ABCEM.
- [24] REQUENA, J. A. V.; SAKURADA, N. e PRANDINI, A. T. L. E. S. Automação das Ações Devidas ao Vento em Edificações Parte 1: Telhados em Duas Águas. *Revista Construção Metálica*, vol.45, p.29–34, 2000. ABCEM.
- [25] REQUENA, J. A. V. e SILVA, N. C. *Automação de Projetos de Treliças Metálicas Planas: Conceitos Básicos e Utilização do Programa AutoMETAL 3.01 - UNICAMP*. Apostila da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Univ. Estadual de Campinas - UNICAMP, código P-GR-905-600, Campinas, SP, Maio 2000.
- [26] REQUENA, J. A. V.; SILVA, N. C.; PASCHOAL, L. G. A. e ARAÚJO, A. H. M. Automação do Projeto de Treliças Metálicas Planas, Constituídas de Barras Tubulares. Publicado em *Congresso Internacional da Construção Metálica - I CICOM*, São Paulo, SP, 2001.
- [27] REQUENA, J. A. V. e SOUSA, J. L. A. O. *Estudo e Automação do Dimensionamento de Elementos Estruturais Constituídos de Perfis Formados a Frio*. Apostila da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Univ. Estadual de Campinas - UNICAMP, código P-GR-001-200, Campinas, SP, Maio 2000.
- [28] SALMON, C. G. e JOHNSON, J. E. *Steel Structures: Design and Behavior*. Harper & Row, Nova Iorque, 1980.
- [29] SCHULTE, H. e YAGUI, T. *Estruturas Metálicas - Primeira Parte: Elementos*. Serviço de Publicações e Encadernação da Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1969.
- [30] SILVA, N. C.; REQUENA, J. A. V. e ASSAN, A. E. Automação de Projetos de Treliças Metálicas Planas. *Revista Construção Metálica*, vol.39, p.32–38, 1999. ABCEM.
- [31] STUTTGART AIRPORT.COM. Apresenta Informações sobre o Aeroporto Internacional de Stuttgart, Alemanha. Disponível em: <<http://www.stuttgart-airport.com>>. Acesso em 05 abr. 2005.

- [32] WARDENIER, J.; KUROBANE, Y.; PACKER, J. A.; DUTTA, D. e YEOMANS, N.
Design Guide for Circular Hollow Sections (CHS) Joints under Predominantly Static Loading. CIDECT (Ed.) and Verlag TÜG Rheinland, Colonia, Alemanha, 1991.